



# **EFICIÈNCIA ENERGÈTICA I CONSUM DE RECURSOS: UNA ESTIMACIÓ DE L'EFECTE REBOT A CATALUNYA**

(Treball de recerca de 8 crèdits)

**Departament d'Economia Aplicada  
Programa de Doctorat en Economia Aplicada**

**Amb el suport del Comissionat per a Universitats i Recerca del Departament d'Innovació,  
Universitats i Empresa de la Generalitat de Catalunya**

**Autor: Jaume Freire González**

**Directors: Dr. Emilio Padilla Rosa  
Dr. Ignasi Puig Ventosa**



## **Paraules clau**

Eficiència energètica, efecte rebot, Paradoxa de Jevons, canvi climàtic, política ambiental.

## **Resum**

L'efecte rebot és aquell mecanisme a través del qual una millora de l'eficiència energètica no produeix el potencial estalvi d'energia esperat, o inclús pot fer que n'augmenti el consum. Això és degut a que una millora de l'eficiència energètica produeix un abaratiment del cost de proveir el servei energètic, que n'impulsa la demanda.

Aquest treball realitza una revisió de la literatura existent sobre efecte rebot directe; analitza els principals aspectes teòrics i metodològics; i finalment estima, a partir de tècniques econòmriques, la magnitud de l'efecte rebot directe per als serveis energètics que utilitzen energia elèctrica a les llars a Catalunya.

## **Agraïments**

Molta gent ha fet possible la realització d'aquest treball. Voldria agrair a l'Emilio Padilla per recolzar-me i acceptar dirigir aquest treball, a l'Ignasi Puig i a tota la gent d'Ent per facilitar-me la feina i donar-me l'oportunitat de continuar els meus estudis, al professor Josep Lluís Raymond pels seus consells, al Juan Carlos i al personal d'administració del Departament d'Economia Aplicada per la seva eficiència. A la meva família i amics per ser-hi sempre i, especialment, al suport ofert pels meus pares durant tots aquests anys, sense el qual no hagués arribat fins aquí.

*“...Hi ha una confusió total d’idees en pensar que l’ús racional de combustible equival a un consum menor. Ben al contrari ens mostra la realitat...Cada millora produïda en un motor, accelera de nou el consum de carbó...”*

**William Stanley Jevons (1865), *The Coal Question***

## ÍNDEX

<b>1. Les polítiques d'estalvi energètic i l'efecte rebot.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducció.....	1
1.2. Tipus d'efecte rebot .....	3
 <b>2. Revisió de literatura .....</b>	<b>6</b>
2.1. Desenvolupament del marc teòric de l'efecte rebot .....	6
2.2. Qüestions preliminars de l'evidència empírica de l'efecte rebot directe .....	8
2.3. Evidència de l'efecte rebot directe per serveis energètics .....	13
2.3.1. Transport privat en vehicles .....	15
2.3.2. Calefacció domèstica .....	16
2.3.3. Refrigeració domèstica per a climatització .....	18
2.3.4. Il·luminació domèstica i no domèstica .....	20
2.3.5. Altres usos domèstics .....	22
 <b>3. Aspectes teòrics i metodològics de l'efecte rebot.....</b>	<b>24</b>
3.1. La demanda de serveis energètics .....	24
3.2. L'efecte rebot com una elasticitat-eficiència de l'energia .....	27
3.3. L'efecte rebot com una elasticitat-preu .....	30
3.3.1. Definicions de l'efecte rebot a partir de les elasticitat-preu.....	31
3.3.2. Característiques de l'elasticitat-preu de la demanda d'energia .....	35
3.3.3. Principals problemes de les estimacions amb elasticitats preu.....	37
3.3.4. La millor aproximació per a determinar la magnitud de l'efecte rebot directe d'un servei energètic.....	39

<b>4. Variables i dades utilitzades .....</b>	<b>42</b>
4.1. Consum d'energia elèctrica .....	42
4.1.1. Consum municipal d'energia elèctrica a les llars .....	42
4.1.2. Consum a Catalunya d'energia elèctrica a les llars .....	43
4.1.3. Consum a Catalunya d'energia elèctrica en refrigeració per a climatització domèstica .....	45
4.2. Preus de l'energia .....	47
4.3. Preu dels aparells de refrigeració domèstica .....	49
4.4. Variables climàtiques.....	50
4.5. Renda de les famílies .....	53
4.5.1. Renda Familiar Disponible Bruta (RFDB) municipal .....	53
4.5.2. Renda Familiar Disponible Bruta (RFDB) a Catalunya .....	53
 <b>5. Model economètric.....</b>	<b>55</b>
5.1. Estimacions de l'efecte rebot amb dades de tot Catalunya.....	56
5.2. Estimacions de l'efecte rebot amb dades municipals .....	59
5.3. Resum d'estimacions de l'efecte rebot directe.....	64
 <b>6. Implicacions per a la política energètica .....</b>	<b>66</b>
 <b>7. Conclusions i futures línies de recerca .....</b>	<b>68</b>
 <b>8. Referències .....</b>	<b>71</b>
 <b>Annex I. Municipis utilitzats a les estimacions de panell i valors estimats dels termes independents individuals del Model d'Efectes Fixos .....</b>	<b>80</b>

## 1. LES POLÍTIQUES D'ESTALVI ENERGÈTIC I L'EFECTE REBOT

### 1.1. Introducció

Dins de les polítiques de reducció de les emissions de carboni per a mitigar els efectes del canvi climàtic prenen especial rellevància les polítiques de millora de l'eficiència energètica (IPCC, 2007). Aquestes han estat impulsades pel propi mercat i des dels poders públics i considerades una prioritat a l'hora de dissenyar la política ambiental. S'espera que una política activa de millora de l'eficiència energètica provoqui una reducció del consum energètic i, en darrer terme, de les emissions contaminants.

Aquesta reducció del consum energètic que a curt termini podria produir-se, tal i com un càlcul d'enginyeria preveuria, no té en consideració altres aspectes, que es produeixen en el mitjà i llarg termini i que poden provocar que la política de millora de l'eficiència no es tradueixi en els resultats esperats en termes de consum total d'energia. Les reduccions potencials de consum d'energia –i consegüentment les emissions resultants– es poden veure minvades pel denominat “efecte rebot”.

Efecte rebot és el terme utilitzat per a descriure els mecanismes que uns menors costos en els “serveis energètics”,<sup>1</sup> deguts a una millora de l'eficiència, provoquen sobre el comportament dels consumidors, ja sigui de manera individual o a nivell agregat. L'efecte es pot traduir en més hores d'utilització del servei energètic, més consumidors utilitzant el servei energètic o en una major qualitat del mateix. Això provoca que la reducció inicial

---

<sup>1</sup> Servei energètic d'un bé és el servei que proporciona a través del consum d'energia, i és, de fet, el que demanda el consumidor –per exemple: el bé estufa, proporciona el servei energètic calefacció; del bé aparell d'aire condicionat, refrigeració; etc.– La producció d'aquests serveis requereix combustible, però també requereix l'input de capital, treball i la gestió experta de les llars o les empreses (Greening *et al.*, 2000).



prevista de consum d'energia es vegi en part compensada o fins i tot pugui veure's incrementada.

És àmpliament acceptat pels economistes que tracten temes d'energia l'existència de l'efecte rebot. La principal controvèrsia rau en la identificació de les fonts que provoquen l'efecte i en el tamany real d'aquest (Greening *et al.*, 2000).

Aquest aspecte –el de la magnitud– resulta de vital importància, ja que la major part de polítiques de millora de l'eficiència energètica es basen en la premissa que l'increment de l'eficiència energètica porta a un consum energètic total menor, i per tant, a unes menors emissions de gasos amb efecte d'hivernacle.

Aquesta premissa resultaria certa si la magnitud de l'efecte rebot fos menor del 100%. En aquest cas les millores d'eficiència energètica aconseguides conduirien a un menor consum d'energia. En el cas que l'efecte rebot fos major del 100%, el consum energètic final seria major que l'inicial, fent que la política de millora de l'eficiència resultés contraproduent. Quan aquest efecte és major del 100%, és a dir, quan la millora de l'eficiència genera un augment net de l'ús del recurs, l'efecte rebot s'anomena "backfire", produint-se la denominada paradoxa de Jevons (Jevons, 1866), o complint-se el postulat de Khazzoom–Brookes (Saunders, 1992).

Un aspecte clau per a determinar la magnitud de l'efecte rebot és com es defineix, ja que en funció d'això l'efecte pot ser insignificant, com argumenten diversos autors, pel fet que l'energia representa una petita proporció dels costos totals dels serveis energètics (Lovins *et al.*, 1988; Lovins, 1998; Schipper i Grubb, 2000), o resultar en un increment important de l'ús del recurs (Herring, 2006; Grubb *et al.*, 1995 i Brookes, 1990, 1992, 1993 i 2000). Conseqüentment, el coneixement de les causes i el seu tamany resultaria particularment rellevant per a dissenyar i implementar un conjunt efectiu de polítiques de reducció del consum de recursos i, en el cas del consum d'energia, de les emissions de carboni.

Pel que fa les estimacions de l'efecte rebot directe,<sup>2</sup> la gran varietat de definicions utilitzades a la literatura econòmica, van ser brillantment resumides i analitzades per Berkhout *et al.* (2000), Dimitropoulos i Sorrell (2006) i Sorrell (2007), entre d'altres.

L'objectiu d'aquest projecte de recerca és contrastar la hipòtesi d'existència d'un efecte rebot per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars, i concretament per a la climatització domèstica a Catalunya, a partir d'estimacions econòmriques i, si aquest es produeix, identificar la magnitud que aquest assoleix a Catalunya. Aquest és un àmbit on, com es mostrarà hi ha poca evidència empírica, i no s'ha realitzat amb anterioritat cap estudi similar a nivell de Catalunya.

La segona part del capítol 1 defineix els tipus d'efecte rebot que es troben a la literatura. El capítol 2 realitza una breu revisió de la literatura existent, el capítol 3 mostra aspectes teòrics i metodològics de l'efecte rebot que es vol estimar; el capítol 4 presenta les principals variables i dades utilitzades per a realitzar les estimacions, el capítol 5 presenta els models econòmrics desenvolupats per a estimar la magnitud de l'efecte rebot, el capítol 6 presenta les principals implicacions per a la política energètica i el capítol 7 presenta les conclusions, així com les futures línies de recerca en aquest àmbit.

## **1.2. Tipus d'efecte rebot**

Es poden identificar a la literatura tres tipus d'efecte rebot que engloben les dues visions, la microeconòmica i la macroeconòmica (Greening *et al.*, 2000; Dimitropoulos i Sorrell, 2006; Sorrell, 2007):

1. Efecte rebot directe: quan la millora de l'eficiència energètica per a un servei energètic particular fa disminuir el preu efectiu d'aquest servei, el que portarà

---

<sup>2</sup> Aquell efecte rebot que es produeix per a un servei energètic concret, com es mostra a l'apartat 1.2.

posteriorment a un increment del seu consum. Això compensarà part o tota la reducció esperada en el consum d'energia.

L'efecte rebot directe es pot descompondre, pel que fa als consumidors en:

- Efecte substitució: a partir de substituir el consum de béns i serveis pel consum –més barat– del servei energètic que ha estat objecte d'una millora en l'eficiència energètica, mantenint constant el nivell de satisfacció del consumidor.
- Efecte renda: l'increment produït en la renda real aconseguit per la millora de l'eficiència energètica permet assolir un major nivell "d'utilitat" per un major consum de tots els béns i serveis, incloent-hi el mateix servei energètic.

De la mateixa manera, per als productors es pot descompondre en:

- Efecte substitució: a partir de substituir l'ús de capital, treball i matèries primeres pel servei energètic més barat, mantenint un nivell constant d'output.
- Efecte output: els estalvis de costos produïts per la millora d'eficiència energètica permet produir un major nivell d'output, el que incrementa el consum de tots els inputs, incloent-hi el servei energètic.

2. Efecte rebot indirecte: el menor preu efectiu del servei energètic pot comportar canvis en les demandes d'altres béns, serveis i factors productius que també requereixen energia per a la seva provisió.

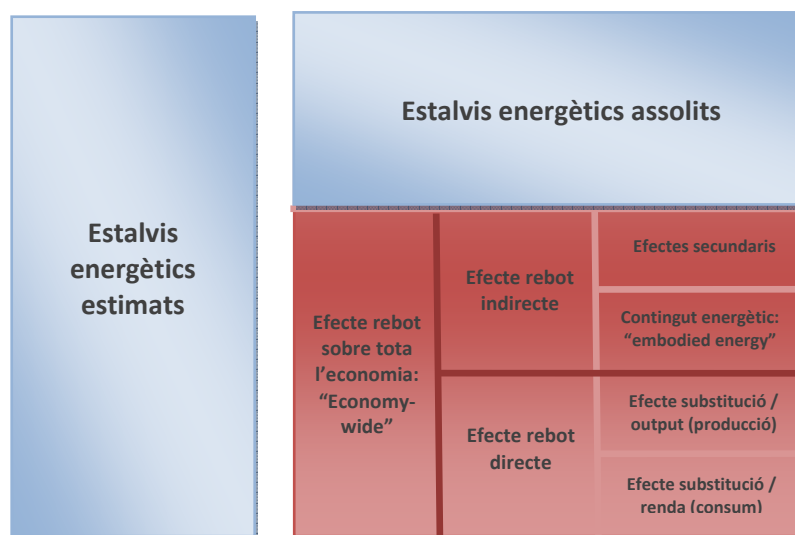
L'efecte rebot indirecte es pot alhora descompondre en:

- Efectes secundaris: com a conseqüència de la millora d'eficiència energètica, com l'energia associada a l'increment en el consum d'altres béns i serveis.

- Contingut energètic –*embodied energy*–: és el consum energètic indirecte necessari per aconseguir la millora d'eficiència energètica, com l'energia requerida per produir i instal·lar un aïllament tèrmic.
3. Efectes sobre tota l'economia –*economy wide effects*–: una caiguda del preu efectiu d'un servei energètic redueix el preu de béns intermedis i finals a través de tota l'economia portant a una sèrie d'ajustaments de preus i quantitats, amb els sectors intensius en l'ús d'energia com a més beneficiats a expenses dels sectors menys intensius en el seu ús. Les millores també reduirien els preus de l'energia impulsant el creixement econòmic, el que incrementaria el consum energètic.

A continuació, el Gràfic 1 mostra la classificació dels diferents tipus d'efectes rebot –en el cas de la no existència de “backfire”, cas en el que no s'assolirien estalvis energètics, sinó que el consum d'energia augmentaria–.

Gràfic 1. Classificació dels efectes rebots



Font: elaboració pròpia a partir de Sorrell (2007).

L'efecte rebot directe només se centra en un servei energètic –visió microeconòmica–, mentre que tant l'efecte rebot indirecte com els efectes sobre tota l'economia s'avaluen des d'una perspectiva macroeconòmica.

## 2. REVISIÓ DE LITERATURA

### 2.1. Desenvolupament del marc teòric de l'efecte rebot

El debat dels economistes sobre l'efecte de les millores en l'eficiència és llarg. Molts economistes reconeixen el treball d'un dels fundadors de l'economia de l'energia: William Stanley Jevons (1835-1882) qui, en el seu treball clàssic "*The Coal Question*", publicat per primer cop al Regne Unit l'any 1865, va argumentar que hi havia una confusió d'idees per a suposar que l'ús racional dels combustibles portava a que se'n fes un consum menor. Ell afirmava que el que succeïa en realitat era tot el contrari.

Jevons posava l'exemple de com la reducció del consum de carbó per tona de ferro a menys d'un terç, va ser seguit, a Escòcia, per un increment total d'unes deu vegades del consum de carbó entre els anys 1830 i 1863, i per no parlar de l'efecte indirecte del ferro barat en accelerar el creixement d'altres branques de la indústria consumidores de carbó. Així, Jevons va posar els fonaments de la idea que l'efecte rebot, en els mercats energètics, resultava major del 100% –d'aquí que un efecte rebot major del 100% o "backfire" de vegades sigui referit com a "paradoxa de Jevons"–.

La crisi energètica produïda durant els anys 70 del segle XX va fer que les qüestions referides al consum i a l'eficiència energètiques tornessin a agafar força. En aquest context, les reivindicacions de què incrementar l'eficiència energètica conduiria a un consum nacional menor van tornar a ser qüestionades per Brookes (1979). Aquest va criticar en un estudi un treball de Leach *et al.* (1979) a l'hora d'estimar els estalvis d'energia al Regne Unit, per errors en la consideració de factors macroeconòmics. Posteriorment a principis dels 80, Khazzoom (1980) va realitzar una crítica similar d'un treball de Lovins (1977). Les crítiques de Brookes i de Khazzoom van ser batejades com el Postulat de Khazzoom-Brookes (KB) per l'economista Saunders (1992).

El terme “efecte rebot” va ser aplicat per primera vegada per Daniel Khazzoom, a l'increment directe de la demanda d'un servei energètic, el subministrament del qual havia incrementat com a conseqüència de millores en l'eficiència tècnica en l'ús d'energia (Khazzoom, 1980, 1982, 1987, 1989; Khazzoom i Miller, 1982). De manera gairebé simultània, Len Brookes definia l'efecte rebot en termes generals, incloent-hi els efectes sobre tota l'economia –economy-wide effects– (Brookes, 1978).

El debat es va fer més intens a principis dels 90, alimentat per la creixent preocupació per l'escalfament global i el debat polític del rol de l'eficiència energètica.

En aquest context, i un cop assumida l'existència de l'efecte rebot, aparegueren dues posicions enfrontades respecte de la quantificació de la magnitud de l'efecte rebot. Aquestes es poden resumir de la següent manera:

- Per una banda, aquells que pensen que el consum posterior d'energia és major que si no hi hagués hagut millora d'eficiència, és a dir, que es produeix un “backfire” –posició bàsicament mantinguda per Len Brookes, i sota determinades circumstàncies per Harry Saunders–.
- Per altra banda, aquells que defensen que el consum d'energia és menor que si no hi ha hagués hagut millora d'eficiència –posició mantinguda per Lee Schipper i altres autors–.

Un problema clau per a resoldre la confrontació entre les dues postures és que no és possible portar a terme un experiment “controlat” que mostri si l'ús d'energia és major o menor que si no hi haguessin hagut millores d'eficiència. Això és degut a que a les economies del món real, la relació entre un canvi en l'eficiència energètica i el subsegüent canvi en el consum energètic es produeix a través d'una gran quantitat de variables confuses i sovint inobservables. Aquestes variables poden incloure des d'aspectes socials, polítics, ambientals, antropològics o psicològics.

## 2.2. Qüestions preliminars de l'evidència empírica de l'efecte rebot directe

La literatura empírica sobre l'efecte rebot es pot resumir en sis tipologies bàsiques d'estudis:

1. Estudis d'avaluació: Consisteixen en la realització d'avaluacions a nivell microeconòmic de l'impacte de millores de l'eficiència energètica específiques sobre la demanda d'energia o de serveis energètics (Hartman, 1988; Train, 1994; Frondel i Schmidt, 2005; Sanders i Philipson, 2006).
2. Estudis de modelatge economètric: Es realitzen a partir de la utilització de fonts de dades secundàries per a realitzar estimacions d'elasticitats de la demanda d'energia o de serveis energètics específics a diversos nivells d'agregació.<sup>3</sup>
3. Estudis d'elasticitats de substitució: Consisteixen en la realització d'estimacions de l'elasticitat de substitució entre energia i capital a diversos nivells d'agregació (Miller, 1986; Stern, 2004; Frondel, 2004).
4. Estudis de Modelatge d'Equilibri General Computable (MEGC): Creació de models macroeconòmics d'equilibri general. Aquests models permeten realitzar una simulació d'impactes contemplant els efectes sobre tota l'economia –*economy-wide effects*– (Lenzen, 1998; Allan *et al.*, 2006; Barker i Foxon, 2006).
5. Estudis de modelatge macroeconomètric: Aquest tipus d'estudis són similars als del punt anterior, però amb la utilització de models econòmics per a l'estimació de determinats paràmetres del model macroeconòmic (Barker *et al.*, 2007; Junankar *et al.*, 2007).
6. Estudis d'energia, productivitat i creixement econòmic: Corresponen a un conjunt d'estudis empírics que inclouen estudis sobre la història econòmica (Fourquet i Pearson, 2006; Richmond i Kaufmann, 2006), teoria de producció neoclàssica (Saunders, 2007), economia ecològica (Stern, 2000), anàlisi de descomposició (Schipper i Grubb, 2000) i anàlisi Input-output (Sartori i Hestnes, 2007).

---

<sup>3</sup> Posteriorment es realitzarà una revisió més exhaustiva de la literatura empírica existent per a diversos serveis energètics d'estudis econòmics de l'efecte rebot directe.

Els dos primers tipus d'estudis corresponen a l'evidència existent sobre l'efecte rebot directe i els quatre darrers corresponen a l'evidència sobre l'efecte rebot indirecte i sobre tota l'economia –*economy-wide effects*–. Són els últims, els que bàsicament inclouen l'evidència sobre l'existència de “backfire” (Sorrell, 2007).

L'anàlisi de la literatura empírica es basarà principalment en el segon punt, és a dir, en els estudis de modelatge economètric, donat que l'objectiu del present treball és la realització d'estimacions de l'efecte rebot directe per a un servei energètic particular a partir de dades secundàries, amb l'aplicació de tècniques economètriques.

L'efecte rebot directe –a diferència de l'efecte rebot indirecte i l'efecte rebot sobre tota l'economia–, com s'ha mencionat, és l'increment en el consum d'un servei energètic particular degut a la millora de l'eficiència energètica produïda en aquell mateix servei energètic, és a dir, no es consideren efectes col·laterals sobre altres consums o serveis energètics. La divergència d'opinions sobre un fet empíric com és l'efecte rebot, mencionada a l'apartat 2.1, és bàsicament deguda, als tres factors citats a continuació (Sorrell, 2007):

1. Els diversos autors utilitzen diferents definicions d'efecte rebot, amb diferents definicions sobre les qüestions associades, com els límits rellevants del sistema. No és el mateix analitzar l'efecte rebot acotant els efectes a un àmbit concret que analitzant com es difon cap a tot el sistema socioeconòmic, etc.
2. L'evidència empírica de l'efecte rebot és suficientment escassa, ambigua i inconclusiva per estar oberta a una àmplia varietat d'interpretacions.
3. Els supòsits fonamentals sobre com opera l'economia estan en discussió. Aquests poden afectar de manera substancial a les estimacions que es realitzin sobre l'efecte rebot.

L'evidència empírica sobre l'efecte rebot directe és molt incompleta, principalment focalitzada en un limitat nombre de serveis energètics com el transport privat i la calefacció de les llars –són els dos àmbits on es troba més evidència empírica–. Aquesta



també està principalment centrada en estudis realitzats sobre els Estats Units i el Regne Unit, tot i que hi ha estudis concrets per a altres països.

Hi ha una clara mancança d'estudis empírics per a altres realitats geogràfiques, especialment per a països menys industrialitzats, on el diferent estadi de desenvolupament econòmic en el que es troben immersos, podria produir una variació significativa de la magnitud de l'efecte rebot en les estimacions. Malgrat algun estudi apunta cap aquí (Roy, 2000), la manca d'evidència empírica no permet ser concloents.

Cal tenir en consideració aspectes clau que afecten les estimacions economètriques sobre la magnitud de l'efecte rebot directe per a un servei energètic. A continuació se citen alguns (Sorrell, 2007):

1. Identificació i mesura de la variable dependent: L'origen de l'efecte rebot és un increment del consum d'un servei energètic com a conseqüència d'una millora de l'eficiència, però la mesura d'un servei energètic és molt difícil d'obtenir. Per exemple, en el cas de la calefacció i refrigeració de les llars, una mesura adequada de servei energètic seria el "confort tèrmic", però aquesta depèn d'un rang de variables, que no són mesurables en la seva totalitat. Com es veurà en capítols posteriors, una aproximació útil és mesurar el consum d'energia utilitzada per a obtenir el servei energètic, però en aquest cas també és necessari disposar de dades del consum energètic utilitzat només per al servei energètic analitzat, separat de la resta d'usos.
2. Identificació i mesura de les variables independents: Encara que la variable dependent sigui mesurable, pot succeir que no existeixin dades de la resta de variables que l'afecten –especialment de les millores d'eficiència energètica–, una alternativa utilitzada –com es veurà en posteriors capítols– és la d'utilitzar el preu de l'energia o del servei energètic. "L'equació de Khazzoom" (Khazzoom, 1980) proporciona un marc per a l'estimació de l'efecte rebot a partir de l'elasticitat-preu de la demanda dels serveis energètics, però com es veurà, els supòsits implícits que comporta poden portar a la sobreestimació de l'efecte rebot. També s'ha de disposar

de mesures d'altres variables –condicions climàtiques, etc.– que afecten el consum d'energia i han d'estar controlades en les anàlisis econòmiques.

3. Atributs del servei energètic: Pot succeir que una millora de l'eficiència energètica per a un servei energètic particular no provoqui una reducció del seu cost per al consumidor, però de manera indirecta, produeixi una millora dels seus atributs. Per exemple, en el cas dels vehicles privats, la millora de l'eficiència pot portar a produir vehicles més potents, més confortables, amb millors característiques, utilitzant la mateixa quantitat d'energia per a recórrer els mateixos quilòmetres. La millora dels atributs d'un servei energètic reduiria la magnitud de l'efecte rebot en les estimacions, si no es tenen en consideració.
4. Consumidors marginals: Donat que una part important de l'efecte rebot ve donada per aquells “consumidors marginals”, que anteriorment no podrien permetre's el servei energètic i que per la millora d'eficiència produïda –i la consegüent reducció del cost– ara sí que poden, la gran quantitat de “consumidors marginals” en els països en desenvolupament fa que, per aquesta via, els potencials rebots en aquells contextos siguin majors (Wirl, 1997).
5. Efecte “saciació”: Hi ha un altre aspecte que pot fer que els nivells de renda siguin importants a l'hora de determinar la magnitud de l'efecte rebot i que, per tant, faci que els rebots siguin majors en països econòmicament menys desenvolupats. L'efecte “saciació” d'un servei energètic es produeix quan l'augment del consum energètic per part del consumidor és cada cop menor degut a que aquest es troba a prop de la seva saciació. Aquest fet es pot veure clarament, per exemple en el consum de refrigeració –o calefacció–. El consum d'energia per a refrigeració augmentarà molt en primer terme, però no ho farà tant a mesura que la temperatura de la llar del consumidor s'acosti al seu nivell màxim de confort tèrmic (Boardman i Milne, 2000; Crujpers, 1995, 1996). Donat que per a la majoria de serveis energètics, els països en desenvolupament es troben més llunyans a la seva saciació, l'efecte rebot resultaria de major magnitud (Roy, 2000). Dins els països més industrialitzats, en aquelles famílies amb rendes més baixes, també pot produir-se un efecte rebot més elevat pel fet que estan més allunyats de la seva saciació (Hong *et al.*, 2006).

6. Millora de l'eficiència sobre la resta de costos del servei energètic: L'efecte rebot serà menor si els nous aparells, més eficients, que produeixen el servei energètic són més cars que les alternatives menys eficients, ja que per aquesta via es podria compensar la reducció del cost del servei energètic que suposa la millora de l'eficiència, i viceversa. A la pràctica, molts equipaments presenten alhora una millora de l'eficiència energètica i una reducció del seu cost en relació als nivells de renda al llarg del temps (Sorrell, 2007).
7. Irreversibilitat de les millores d'eficiència: les elasticitats preu de l'energia no són simètriques al llarg del temps i tendeixen a ser majors per a períodes amb increments dels preus de l'energia que amb decrements d'aquests preus (Kouris, 1982; Gately, 1992, 1993; Dargay, 1992; Dargay i Gately, 1994, 1995; Haas i Schipper, 1998; Berkhout *et al.*, 2000). L'explicació primària d'aquest fet és per la irreversibilitat de les inversions en eficiència energètica (Walker i Wirl, 1993). Quan els preus s'incrementen, els consumidors i els productors inverteixen en equipaments més eficients, i aquestes inversions tendeixen a mantenir-se quan els preus decreixen. Com a resultat, les estimacions basades en elasticitats preu variaran en funció de l'evolució dels preus del període analitzat (Haas i Schipper, 1998).

Pel que fa a la literatura sobre estimacions economètriques de l'efecte rebot directe per a determinats serveis energètics, la major part d'estudis empírics, ja sigui per la importància que tenen com per la disponibilitat de dades, són dels següents àmbits: enllumenat públic (Herring, 1999), transport privat, calefacció, refrigeració i en menor mesura altres usos domèstics com il·luminació, calefacció d'aigua, etc. –dins l'àmbit de les llars–. També hi ha estudis empírics de l'efecte rebot directe en l'àmbit industrial o comercial (Nadel, 1993; Eto *et al.*, 1994, 1995), però són més limitats i queden fora de l'abast d'aquest treball. Grepperud i Rasmussen (2004) afirmen que l'extensió de l'efecte rebot directe a la indústria depèn de les possibilitats de substitució dels inputs: resulta major en indústries –com les siderúrgiques– amb possibilitats de substitució limitades, que en indústries –com les dels productes químics i minerals– amb majors oportunitats d'ajustar els inputs productius.

### 2.3. Evidència de l'efecte rebot directe per serveis energètics

En aquest apartat es fa una revisió de la literatura existent sobre l'efecte rebot directe per a serveis energètics bàsicament domèstics, tot i que també es mostra evidència de l'efecte rebot directe fora de les llars –que és menys nombrosa–. Per als usos domèstics, els principals esforços destinats a realitzar estimacions economètriques de l'efecte rebot han estat en relació a les millores d'eficiència en els següents quatre àmbits: transport privat en vehicles, calefacció domèstica, refrigeració domèstica per a climatització i il·luminació domèstica i no domèstica.

També s'han fet alguns estudis, tot i que en menor nombre, per a altres usos finals domèstics. El fet que hi hagi menys evidència és degut, en gran part, a la dificultat en l'obtenció de dades sobre el seu consum energètic. Alguns d'aquests àmbits són la calefacció d'aigua, l'ús d'aparells electrònics i alguns electrodomèstics individuals com neveres, rentadores, etc.

De manera genèrica, les variables clau que afecten el consum d'energia per a usos domèstics inclouen, principalment (Greening *et al.*, 2000): els nivells de renda, altres classificacions de la despesa, factors demogràfics de les llars, el cost del capital que utilitza l'energia, el cost d'oportunitat del capital, altres costos, el tamany i característiques constructives de les llars i l'eficiència en l'ús de l'energia.

A continuació, la Taula 1 mostra un resum dels principals resultats trobats en els àmbits mencionats als EEUU, realitzat en la revisió de la literatura empírica de l'efecte rebot feta per Greening *et al.* (2000).

Taula 1. Estimacions de l'efecte rebot directe per ús final del sector domèstic als EEUU

Ús final	Efecte rebot	Número d'estudis revisats
Transport vehicles	10-30%	22*
Calefacció	10-30%	26**
Refrigeració	0-50%	9***
Calefacció d'aigua	<10-40%	5***
Il·luminació	5-12%	4***
Altres electrodomèstics	0%	2***

\* Aquests estudis estan fets amb un número tal de diferents mètodes que proveeixen una bona correspondència de les estimacions.

\*\* Aquests estudis estan fets amb només un número moderat de diferents mètodes que mostren alguna variabilitat en les estimacions.

\*\*\* Aquests estudis estan fets amb només un o dos mètodes diferents i són inconclusius en els resultats.

Font: Greening *et al.* (2000).

Dins els estudis realitzats sobre l'efecte rebot directe a les llars s'observa que també existeix una gran variabilitat en els resultats. Part d'aquesta variabilitat reflecteix la tecnologia utilitzada en la producció del servei i la consciència dels consumidors durant el consum del servei. Hi ha però una altra part d'aquesta variabilitat que es deu als supòsits implícits que es realitzen en alguns estudis sobre el comportament dels consumidors, per exemple (Greening *et al.*, 2000):

- Consideració dels serveis energètics com a bé normal, ignorant els efectes d'haver saciat una necessitat.
- Limitacions temporals. L'augment de la demanda de determinats serveis energètics va acompanyada d'un augment en el temps necessari per a consumir-los. Això fa que el consumidor hagi de sacrificar cada vegada una major proporció del seu temps en el consum del servei energètic, el que reduiria l'efecte rebot (Dimitropoulos i Sorrell, 2006).
- Doble rol del consumidor com a productor i consumidor dels serveis energètics. El que significa que cada llar té un preu implícit diferent pel servei energètic (Cuijpers, 1995, 1996). Els preus implícits no només inclouen els preus de l'energia, també inclouen els costos de capital —és a dir, dels aparells que

proporcionen els serveis energètics– i el treball de les llars. També inclou diferències en els estils de vida.

- d) Molt treballs no han considerat la importància de determinades característiques tècniques de la demanda dels serveis energètics. Per exemple, per a la calefacció o refrigeració són importants factors com la situació i característiques de la llar per a aprofitar energia solar.
- e) Sovint, per falta de dades, en funció de les variables proxy utilitzades per a la seva estimació, l'efecte rebot pot estar infraestimat o sobreestimat.
- f) Problemes d'especificació dels models construïts.

La no consideració de tots aquests factors en el treball empíric provoca estimacions esbiaixades dels paràmetres. Especialment quan l'elasticitat-preu de la demanda del servei energètic resulta elàstica (Einhorn, 1982; Schwartz i Taylor, 1995). Greening *et al.* (2000) indiquen que com a conseqüència de la falta de dades de consum final o de les variables clau explicatives associades a aquest consum final, moltes de les mesures de l'efecte rebot deuen estar sobreestimades.

A continuació es mostra un recull dels principals estudis empírics sobre l'efecte rebot directe en els diversos àmbits mencionats.

#### 2.3.1. Transport privat en vehicles

La major part de l'evidència empírica sobre la magnitud de l'efecte rebot directe prové d'estudis sobre el transport als EUA, on hi ha bones dades estadístiques de quilòmetres recorreguts per vehicle i de consum de gasolina. A continuació, la Taula 2 mostra alguns estudis realitzats d'estimacions de l'efecte rebot directe en aquest àmbit.

Taula 2. Estudis empírics de l'efecte rebot directe per al transport privat

<b>Autors</b>	<b>País objecte de les estimacions</b>	<b>Resultats de les estimacions de l'efecte rebot</b>
Blair <i>et al.</i> (1984)	EEUU (Florida)	21%
Leung i Vesenka (1987)	EEUU (Hawaii)	25%
Mayo i Mathis (1988)	EEUU	A curt termini del 22%, a llarg termini del 26%, però sense significació estadística
Weinblatt (1989)	EEUU	Per sota del 10%
Gately (1990)	EEUU	9%
Green (1992)	EEUU	Entre el 5% i el 19%
Jones (1993)	EEUU	A curt termini del 13%, a llarg termini al voltant del 30%
Walker i Wirl (1993)	Alemanya i Itàlia	Entre el 32% (Alemanya) i el 51% (Itàlia)
Haughton i Sarkar (1996)	EEUU	A curt termini entre el 9% i el 16%, a llarg termini al voltant del 22%
Green <i>et al.</i> (1998)	EEUU	A llarg termini al voltant del 20%
West (2004)	EEUU	87%
Small i Van Dender (2005)	EEUU	A curt termini del 4,5%, a llarg termini al voltant del 22%
Frondel <i>et al.</i> (2007)	Alemanya	A llarg termini entre el 56% i el 66%

Font: Elaboració pròpia a partir de Greening *et al.* (2000), Binswanger (2001) i Sorrell (2007).

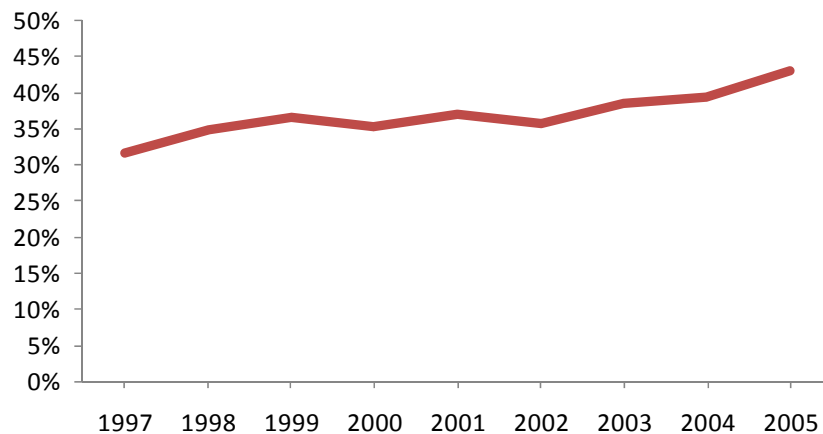
Els resultats indiquen que el número de quilòmetres viatjats per vehicle incrementa –o rebota– entre el 9% i el 87% com a resultat de la millora en l'eficiència de l'ús de gasolina.

### 2.3.2. Calefacció domèstica

Aquest és un dels àmbits on s'han realitzat més estudis empírics de l'efecte rebot directe, juntament amb el del transport privat. Això és tant per la disponibilitat de dades com per la importància que té aquest servei energètic sobre el consum conjunt d'energia a les llars. La calefacció és l'àmbit més demandant d'energia a les llars en la majoria dels països de la OCDE. Segons el Departament de Comerç i Indústria del Regne Unit (*Department of Trade and Industry*, 2007), l'any 2005, la calefacció a les llars dels Regne Unit representava el 60% de l'ús energètic a les llars. Tot i així, en països més calorosos del sud d'Europa, aquest percentatge podria veure's reduït i prendre més importància la despesa energètica per refrigeració. A Catalunya, i segons dades de l'Institut Català de l'Energia

(ICAEN), la proporció del consum d'energia per a calefacció a les llars ha passat del 31,8% del consum total d'energia l'any 1997, a assolir el 43,1% l'any 2005.

Gràfic 2. Evolució del percentatge del consum d'energia per a calefacció domèstica sobre el consum total d'energia a les llars a Catalunya. Període 1997-2005.



Font: Elaboració pròpia a partir de dades de l'ICAEN.

La magnitud de l'efecte rebot en les diferents estimacions varia substancialment degut a la definició de la mesura de l'activitat i els mètodes utilitzats. Donat que la calefacció té característiques de bé públic local, el confort tèrmic és una bona mesura d'aquesta activitat. Els determinants del confort tèrmic inclouen (Greening *et al.*, 2000): actituds personals cap al confort tèrmic; nivells d'activitat dels individus; temperatura de l'aire; temperatura radiant mitjana –canvi de calor entre el cos humà i la temperatura del voltant–; velocitat de l'aire o corrent i humitat.

Moltes d'aquestes variables no acostumen a ser recollides i, per tant, difícilment, el confort tèrmic pot ser avaluat (Isakson, 1983). El fet de no poder controlar els factors que també afecten la demanda de calefacció fa que de les estimacions en resultin uns paràmetres esbiaixats (Quigley i Rubinfeld, 1989). Segons Schwartz i Taylor (1995), estimacions economètriques que incloguin aquests factors produeixen estimacions més baixes de l'efecte rebot. A continuació, la Taula 3 mostra alguns dels estudis que mostren



evidència sobre l'existència de l'efecte rebot associada a la calefacció domèstica així com els principals resultats obtinguts en les estimacions.

Taula 3. Estudis empírics sobre l'efecte rebot directe de la calefacció domèstica

<b>Autors</b>	<b>País objecte de les estimacions</b>	<b>Resultats de les estimacions de l'efecte rebot</b>
Khazzoom (1986)	EEUU (Sacramento)	65%
Dubin <i>et al.</i> (1986)	EEUU	Entre el 8% i el 13%.
Dinan (1987)	EEUU	Efecte rebot petit però estadísticament significatiu
Hsueh i Gerner (1993)	EEUU	35% per a electricitat i 58% per gas
Schwartz i Taylor (1995)	EEUU	A llarg termini entre l'1,4% i el 3,4%
Hirst (1987)	EEUU	Entre el 5% i el 25%
Nesbakken (2001)	Noruega	Entre el 15% i el 55% (mitjana del 21%)
Guertin <i>et al.</i> (2003)	Canada	A llarg termini del 29% al 47%

Font: Elaboració pròpia a partir de Greening *et al.* (2000), Binswanger (2001) i Sorrell (2007).

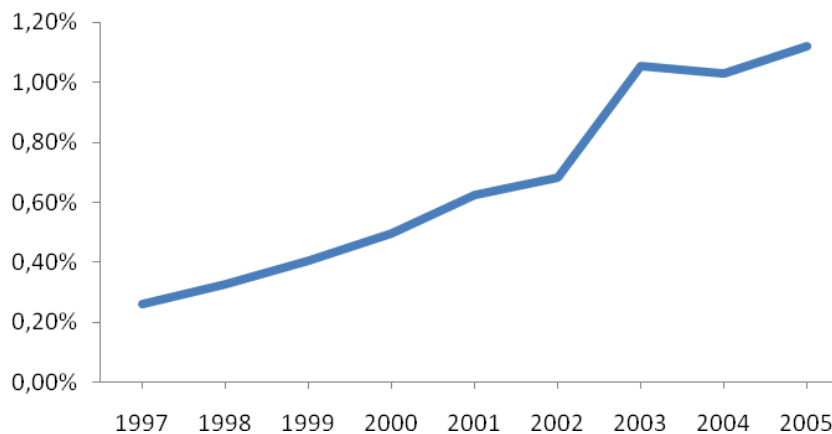
Greening *et al.* (2000), en l'exhaustiva revisió de la literatura que van realitzar, van arribar a la conclusió que per a una millora en l'eficiència energètica del combustible per a calefacció a les llars, el rebot a causa dels efectes substitució i renda combinats estaven entre el 10% i el 30% dels estalvis potencials d'energia. El que suggereix que qualsevol millora tecnològica en aquest àmbit tindria una efectivitat entre el 70% i el 90% en reduir el consum energètic per a calefacció de manera directa. Les estimacions dels estudis de la Taula 3 situen l'efecte rebot per a calefacció a les llars entre l'1,4% de l'estudi de Schwartz i Taylor (1995) i el 65% de l'estudi de Khazzoom (1986). De la mateixa manera que en el cas dels estudis per al transport privat, la gran variabilitat de resultats és deguda a la varietat de mètodes i dades utilitzades en els diferents estudis. L'estimació en diferents períodes i contextos geogràfics també conduiria a resultats diferents.

### 2.3.3. Refrigeració domèstica per a climatització

La refrigeració domèstica per a climatització és un dels casos menys estudiats en la literatura empírica sobre l'efecte rebot directe. El consum d'energia per a refrigeració és,

en general, menor que el consum per a d'altres usos, però ha experimentat un creixement important durant la darrera dècada. Segons dades de l'ICAEN, l'evolució a Catalunya de la proporció del consum d'energia per a refrigeració, en relació al consum total d'energia de les llars, és la que mostra el Gràfic 3.

Gràfic 3. Evolució del percentatge del consum d'energia per a refrigeració domèstica sobre el consum total d'energia a les llars a Catalunya. Període 1997-2005



Font: Elaboració pròpia a partir de dades de l'ICAEN.

S'observa com el consum d'energia per a aquest ús ha passat de ser del 0,26% l'any 1997 a ser de l'1,15% l'any 2005, el que suposa un increment important, malgrat no suposar un percentatge elevat del consum total de les llars.

En aquest cas cal considerar les mateixes qüestions que a la calefacció sobre la identificació i mesura d'aquesta activitat. Els determinants del confort tèrmic també són els mateixos que els citats per a la calefacció –apartat 2.3.2–. Però en aquest cas cal fixar més l'atenció en els nivells d'humitat. Dubin *et al.* (1986) indiquen que els nivells d'efecte rebot potencial depenen molt de la capacitat d'utilització de l'aire condicionat, és a dir, la resposta als preus i l'efecte rebot serà menor en mesos on l'aparell està funcionant a plena capacitat.

Hausman (1979) i Dubin *et al.* (1986) van proveir les millors mesures de l'efecte rebot potencial en aquest àmbit, però tots dos estudis es van realitzar per a mostres petites i

durant períodes de preus creixents de l'energia. Tots dos foren fets per als EEUU. Hausman (1979) va estimar un efecte rebot a curt termini del 4% i a llarg termini del 26,5%; Dubin *et al.* (1986) van estimar un efecte rebot entre l'1 i el 26%. Segons Greening *et al.* (2000), d'aquests dos estudis es pot estimar un efecte rebot total entre 0% i el 50%, afirmant que aquesta variació tant àmplia es pot explicar pels factors que afecten a aquesta activitat, i com a causa primària la capacitat d'utilització, és a dir si l'aparell està funcionant a plena capacitat –on hi haurà poc marge a efectes rebot– o bé si no està funcionant-hi –on hi haurà més marge a efectes rebot–.

#### 2.3.4. Il·luminació domèstica i no domèstica

La il·luminació és un altre dels àmbits que ha estudiat la literatura empírica sobre l'efecte rebot directe, en aquest àmbit es troben estudis tant d'il·luminació domèstica com d'enllumenat públic.

Pel que fa a l'àmbit de la il·luminació domèstica, cal destacar un estudi pel Regne Unit que van realitzar Fouquet i Pearson (2006) en el que mostraven l'evolució de la demanda d'energia per a il·luminació, així com el progrés de la tecnologia d'il·luminació, al llarg de set segles, des dels canelobres medievals, passant per les làmpades d'oli del segle XVIII, els llums de gas del segle XIX i finalment les làmpades elèctriques del segle XX. En aquest estudi es mostra com cada vegada que s'introdueix una nova tecnologia es millora l'eficiència, i el consum s'incrementa de manera espectacular. Els llums elèctrics actuals són 700 vegades més eficients que les làmpades d'oli del segle XVIII, mentre que el consum –mesurat en lúmens-hora per càpita– és 6.500 vegades major. La Taula 4 mostra l'evolució de certes variables rellevants durant els dos últims segles.

Taula 4. Canvis en el preu, l'eficiència i el consum de la il·luminació domèstica, 1800-2000.

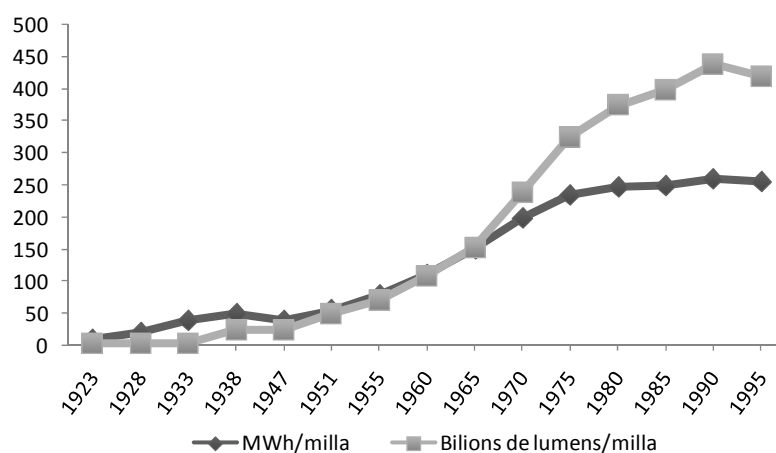
Any	Preu combustible per a il·luminació (nombres índex)	Eficàcia en la il·luminació	Preu de la llum per lumen (nombres índex)	Consum (lúmens-hora per càpita)	PIB real per càpita
1800	100	100	100	100	100
1850	40	400	26,8	400	100
1900	26	700	4,2	8.600	300
1950	40	44.100	0,15	154.400	400
2000	18	71.400	0,03	664.100	1.500

Índex 1800 = 100.

Font: Fouquet i Pearson (2006).

Pel que fa a l'enllumenat públic, Herring (1999) va realitzar un estudi empíric pel Regne Unit pel període 1920-1995. L'elecció d'aquest sector va ser deguda a l'existència de bones sèries estadístiques del seu consum d'electricitat, de l'eficiència de les làmpades i del quilometratge dels carrers. Aquestes estadístiques van mostrar un increment de 30 vegades el consum d'electricitat per a l'enllumenat públic, 20 vegades l'eficiència de les làmpades, però menys del 50% en el quilometratge dels carrers. Durant el mateix període, la intensitat energètica, en termes de MWh per milla va incrementar 25 vegades, amb un augment del 250% des del 1960 –veure Gràfic 4–.

Gràfic 4. Canvis en l'energia i en la intensitat de la llum per a l'enllumenat públic al Regne Unit. Període 1920-1995.



Font: Herring (1999).

La major part del gran increment en l'eficiència energètica de les làmpades ha adoptat la forma de majors nivells de servei, tant en majors mil·lions il·luminades com en majors nivells d'il·luminació, i no d'un menor consum. El consum i l'eficiència van estabilitzar-se als anys 90, mentre que durant un període de creixement ràpid del consum, del 1960 al 1980, l'eficiència de les làmpades va créixer un 50%.

Aquest procés de canvi tècnic va ser impulsat pels fabricants, que contínuament busquen millores en l'eficiència per tal d'abaratir costos i crear nous mercats. Segons Herring (1999), l'expansió massiva del consum d'electricitat al segle XX va ser alimentada pel continu descens del preu de l'electricitat, acompanyat per un increment de l'eficiència d'aproximadament unes 10 vegades, que va impulsar el desenvolupament de nous béns i serveis elèctrics: il·luminació elèctrica el 1900, refrigeració domèstica el 1930, televisió el 1950, microones i vídeos el 1980, ordinadors i Internet el 1990.

#### 2.3.5. Altres usos domèstics

Hi ha diverses consideracions teòriques que suggereixen que els efectes rebot directes per a la majoria de la resta de serveis energètics a les llars són menors que els que es produïrien per a la calefacció (Sorrell, 2007). En contrast amb el consum energètic per a calefacció: el cost de l'energia per a aquests serveis representa típicament una petita proporció dels costos totals de proveir-los; el cost total del servei energètic representa una petita proporció de la despesa total de les llars i els consumidors són relativament insensibles al cost energètic d'aquests serveis. Addicionalment a aquests factors, les elasticitats-preu poden ser menors si el servei energètic en qüestió és d'alguna manera essencial per a la "vida diària" –un bé de primera necessitat–. Cuinar, escalfar aigua i rentar roba han passat a entrar dins d'aquesta categoria en les societats més industrialitzades. Altres serveis energètics com els aparells electrònics, pel fet de no entrar dins d'aquesta categoria, es podria dir que tenen unes elasticitats preu baixes per les raons citades anteriorment.

Segons el Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015 (Departament de Treball i Indústria, 2006), l'any 2003, la il·luminació de la llar representava el 7,5% del consum energètic total de les llars; les neveres, el 8,8%; la resta d'electrodomèstics el 6,2% i els aparells electrònics representaven un 5,3%.

Hi ha poca evidència sobre efecte rebot per a altres usos finals domèstics (Nadel, 1993). Aquests inclouen escalfar aigua, aparells electrònics, alguns electrodomèstics concrets com neveres, rentadores, etc. Tots aquests usos presenten molts problemes a l'hora d'identificar-los i mesurar el seu consum energètic, ja que hi ha poques dades disponibles. Donada la inexistència de dades sobre aquestes activitats, la majoria d'aquests estudis es basen en l'anàlisi de la demanda condicional, els resultats dels quals no són consistents (Angel Economic Reports and Applied Econometrics, 1984).

Pel que fa l'efecte rebot per a calefacció d'aigua a les llars, Hartman (1984) va trobar que aquest es trobava entre el 10% i el 40%. Guertin *et al.* (2003) van trobar un efecte rebot a llarg termini entre el 34% i el 38% per a escalfar aigua i entre el 32% i el 49% per a un conjunt de serveis energètics que incloïen il·luminació i aparells electrònics. Davis (2007) proveeix l'únic exemple d'estimació de l'efecte rebot per a rentar roba a les llars –que juntament amb l'assecar roba, afirma que representa una desena part del consum d'energia a les llars dels EEUU–. Davis va trobar un efecte rebot per a aquest servei energètic inferior al 5%.

### 3. ASPECTES TEÒRICS I METODOLÒGICS DE L'EFECTE REBOT

A continuació s'analitzen els principals aspectes teòrics relacionats amb l'efecte rebot. En primer terme s'establirà la terminologia i les principals definicions. Posteriorment s'entrarà en aspectes metodològics i centrats específicament en l'anàlisi de l'efecte rebot directe, analitzant les diverses definicions existents a la literatura, fins a arribar a la que s'utilitzarà en aquest treball, per a portar a terme la recerca empírica.

#### 3.1. La demanda de serveis energètics

En aquest apartat s'exposen els principals conceptes i definicions que cal tenir en compte per a l'anàlisi economètrica de l'efecte rebot directe (Becker, 1965; Khazzoom, 1980; Berkhout *et al.*, 2000; Dimitropoulos i Sorrell, 2006; Sorrell, 2007).

En el context domèstic, la demanda d'energia ( $E$ ) es deriva de la demanda de serveis energètics ( $SE$ ); com són la demanda de refrigeració, de confort tèrmic o de força automotriu. Aquests serveis són proveïts a través d'una combinació d'energia, d'aparells convertidors d'energia, d'altres inputs i del propi treball dels membres de la llar. En aquest context, s'assumeix que els membres de la llar obtenen la seva utilitat del consum d'aquests serveis energètics més que no pas del consum dels propis aparells.

Una característica essencial del servei energètic és el treball útil ( $S$ ) obtingut, que pot ser mesurat de diverses maneres a través d'una varietat d'indicadors termodinàmics i físics (Patterson, 1996). Aquests indicadors alhora poden ser descompostos de diverses maneres per tal de mostrar la importància relativa de les variables que hi contribueixen.

Un aspecte que cal considerar en aquesta anàlisi és que els serveis energètics tenen atributs ( $A$ ) o característiques, que es combinen amb el treball útil i afecten el consum d'energia. La combinació del treball útil i els atributs proporciona un servei energètic en particular:

$$SE_i = f(S_i, A_i) \quad (1)$$

La funció de producció domèstica de Becker proporciona un marc útil per a entendre la demanda de serveis energètics (Becker, 1965). Aquest model assumeix que les llars produeixen serveis energètics per al seu propi consum, i que el treball útil d'un servei energètic s'obté a través d'una combinació de matèries primeres energètiques ( $E$ ), capital ( $K$ ), altres béns de mercat ( $O$ ) i part del treball propi dels membres de la llar, mesurat en quantitat de temps ( $T$ ). En una anàlisi de la refrigeració, hi hauria, per exemple l'electricitat ( $E$ ), els aparells d'aire condicionat ( $K$ ), les despeses de manteniment i operatives ( $O$ ) i el temps per a la posada en marxa i funcionament i qüestions relacionades amb l'obtenció de refrigeració ( $T$ ).

La provisió de treball útil per a un servei energètic particular pot ser descrita per una funció de producció, representant l'output màxim que pot ser assolit a través de la tecnologia disponible, per a un nivell donat d'energia i altres inputs (Wirl 1997). Donat que, com mostra l'equació (1) els atributs també afecten la provisió d'un servei energètic, tenim que:

$$SE_i = f(E_i, K_i, O_i, T_i, A_i) \quad (2)$$

La part de la utilitat de les llars que depèn d'aquests serveis energètics es pot expressar:

$$U_{SE} = f(SE_1, SE_2, SE_3, ..., SE_n) \quad (3)$$

Una assumpció addicional és que les llars estan subjectes a restriccions pressupostàries i temporals. Pel que fa la primera tenim que:

$$V + T_w P_w \geq \sum_{i=1, n} (P_E E_i + P_O O_i + \delta_K K_i) \quad (4)$$

Sent  $V$  la renda no salarial,  $T_w$  el temps gastat en el mercat laboral,  $P_w$  el rati salarial mitjà;  $P_E$  i  $P_O$  representen el preu unitari de l'energia i dels altres béns, respectivament;  $\delta_K$  és un factor de descompte –l'expressió  $P_K = \delta_K K(A)$  proporciona els costos de capital anualitzats–.



La restricció temporal de les llars ve donada per:

$$T = T_w + \sum_{i=1}^n T_i \quad (5)$$

On  $T_i$  representa el temps dedicat a produir el treball útil  $S_i$ . Donat que el diner i el temps són, en part, intercanviables a través de decisions sobre  $T_w$  (Becker, 1965), les restriccions de renda (4) i de temps (5) poden fusionar-se en una única restricció que englobi les dues:

$$V + P_w T \geq \sum_{i=1}^n (P_E E_i + P_O O_i + \delta_K K_i + P_w T_i) \quad (6)$$

En el context de l'anàlisi de l'efecte rebot directe a les llars, el marc que proporciona la funció de producció de Becker permet (Sorrell, 2007): en primer lloc, derivar la utilitat de les llars a partir del consum dels serveis energètics, i no de les matèries primeres energètiques; segon, reconeix el doble paper productor i consumidor de les llars d'aquests serveis; i tercer, el temps és un input important a considerar en la producció d'aquests serveis.

Les crítiques al model de Becker han vingut bàsicament pels supòsits considerats. Algunes d'aquestes es poden veure a Pollack i Wachter (1975) i Juster i Stafford (1991). Ofereix però un gran nombre d'avantatges enfront altres models convencionals de demanda d'energia, i les prediccions del model estan àmpliament confirmades per la recerca empírica (Juster i Stafford, 1991).

Una important contribució del model de Becker a la recerca empírica que es porta a terme en aquest treball és tenir present que el consum d'un servei energètic implica tres *trade-offs* (Sorrell, 2007):

1. Entre el consum de treball útil i el consum d'altres atributs d'un servei energètic.
2. Entre energia, capital, altres béns de mercat i temps, en la producció d'un servei energètic.
3. Entre el consum de diferents serveis energètics.

### 3.2. L'efecte rebot com una elasticitat-eficiència de l'energia

De la mateixa manera que l'apartat 3.1, els raonaments seguits en aquest apartat es poden trobar a Khazzoom (1980), Henly *et al.* (1988), Berkhout *et al.*, (2000), Dimitropoulos i Sorrell (2006) i a Sorrell (2007).

A continuació es resumeixen les principals maneres de mesurar l'efecte rebot directe existents a la literatura basada en estimacions econòmriques. Alguns autors estableixen l'elasticitat-eficiència de la demanda d'energia com una mesura directa de l'efecte rebot (Khazzoom, 1980; Berkhout *et al.*, 2000; Dimitropoulos i Sorrell, 2006), tot i que, com es mostra a continuació, també hi ha altres variables que sota certs supòsits es poden considerar una mesura de l'efecte rebot.

El concepte d'efecte rebot originari de Khazzoom (1980) va ser deduït pel cas d'un servei energètic individual. Va prendre com a punt de partida la demanda d'energia per a un servei energètic particular com a funció del preu del treball útil d'aquest servei ( $P_S$ ).

L'eficiència energètica ( $\varepsilon$ ) d'un sistema energètic es pot definir com:

$$\varepsilon = S / E \quad (7)$$

És a dir, el treball útil aconseguit per unitat d'energia consumida. El preu del treball útil ( $P_S$ ) es pot definir com el preu de l'energia ( $P_E$ ) entre l'eficiència energètica:

$$P_S = P_E / \varepsilon \quad (8)$$

De manera genèrica, s'entén com cost generalitzat del treball útil ( $P_G$ ), a la suma dels costos dels diversos factors del treball útil:

$$P_G = (P_E / \varepsilon) + P_K + P_M + P_T \quad (9)$$

On  $P_K$  són els costos de capital anualitzats,  $P_M$  són els costos de manteniment i operatius, i  $P_T$  són els costos de temps.

A partir de l'equació (9), el que succeeix en realitat, és que la millora d'eficiència energètica redueix el cost energètic unitari del treball útil ( $\Delta P_s < 0$ ) i, per tant, el cost total. Si s'assumeix que el servei energètic té les característiques d'un bé normal,<sup>4</sup> els consumidors demandaran més treball útil ( $\Delta S > 0$ ), i aleshores, la variació proporcional en el consum d'energia serà menor que la variació en l'eficiència energètica ( $\Delta E / E < -\Delta \varepsilon / \varepsilon$ ).

La variació en la demanda de treball útil deguda a una variació en l'eficiència energètica pot ser mesurada per **l'elasticitat-eficiència energètica de la demanda de treball útil** ( $\eta_\varepsilon(S)$ ):

$$\eta_\varepsilon(S) = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{S} \quad (10)$$

De la mateixa manera, la variació de la demanda d'energia deguda a una variació en l'eficiència energètica es pot mesurar amb **l'elasticitat-eficiència energètica de la demanda d'energia** ( $\eta_\varepsilon(E)$ ):

$$\eta_\varepsilon(E) = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} \quad (11)$$

Substituint  $E = S / \varepsilon$ , de l'equació (7) a l'equació (11) i prenent derivades parcials:

$$\eta_\varepsilon(E) = \frac{\partial \left( \frac{S}{\varepsilon} \right)}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{\left( \frac{S}{\varepsilon} \right)} = \left( -S \frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \right) \left( \frac{\varepsilon^2}{S} \right) = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{S} - 1$$

I d'aquí es pot derivar la següent relació entre les elasticitats de l'equació (10) i l'equació (11):

---

<sup>4</sup> Un bé "normal" és aquell que davant d'un increment de la renda real del consumidor, veuria incrementada la seva demanda, mentre que un bé "inferior" seria aquell que la seva demanda es veuria reduïda.

$$\boxed{\eta_{\varepsilon}(E) = \eta_{\varepsilon}(S) - 1} \quad (12)$$

L'expressió que mostra l'equació (12) és la definició més comuna com a mesura de l'efecte rebot directe per un servei energètic particular (Berkhout *et al.*, 2000).

D'aquesta manera s'arriba a una conclusió important: l'estalvi energètic degut a una millora de l'eficiència energètica es correspondrà amb el que prediuen els models matemàtics només quan l'elasticitat-eficiència de la demanda de treball útil per a un servei energètic sigui igual a zero ( $\eta_{\varepsilon}(S) = 0$ ), aleshores l'elasticitat-eficiència de la demanda d'energia ha de ser igual a -1 ( $\eta_{\varepsilon}(E) = -1$ ). Un efecte rebot positiu implica que  $\eta_{\varepsilon}(S) > 0$ , i per tant  $|\eta_{\varepsilon}(E)| < 1$ .

Des d'aquesta perspectiva, si es donés el cas que  $\eta_{\varepsilon}(S) > 1$  —és a dir, que la demanda fos elàstica— o bé que  $\eta_{\varepsilon}(E) > 0$ , estaríem parlant d'un cas especial d'efecte rebot en el qual una millora de l'eficiència energètica acaba produint un increment del consum energètic. Aquest cas es denomina “backfire” en la literatura (Saunders, 1992).

Una millora tecnològica que produeix una millora en l'eficiència energètica pot conduir a diverses manifestacions de l'efecte rebot:

- Un increment en el nombre d'aparells convertidors d'energia (NO). Un impacte important de la major eficiència i els conseqüents menors costos dels serveis energètics és en els nous consumidors —aquells que anteriorment no podien permetre's el servei—.
- Un increment en el tamany mitjà dels nous aparells convertidors d'energia (CAP).
- Un increment de la seva utilització mitjana (UTIL), o bé un decreixement del seu factor de càrrega mitjana (F) —com per exemple podria succeir en el cas dels vehicles, on es realitzarien més trajectes amb un únic ocupant al vehicle—.

Es pot expressar la demanda de treball útil com:

$$S = NO * CAP * UTIL \quad (13)$$

D'aquesta manera l'equació referent a l'elasticitat-eficiència energètica de la demanda d'energia es pot descompondre en diversos factors. A partir de les equacions (10), (11), (13) i de  $S = \varepsilon E$  derivat de l'equació (7):

$$\eta_{\varepsilon}(E) = \frac{\varepsilon}{E} \left[ -\frac{(NO * CAP * UTIL)}{\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon} \left( (NO * CAP) \frac{\partial UTIL}{\partial \varepsilon} + (CAP * UTIL) \frac{\partial NO}{\partial \varepsilon} \right) \right]$$

substituint  $E = (NO * CAP * UTIL) / \varepsilon$  i cancel·lant termes:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = -1 + \left( \frac{\varepsilon}{UTIL} \frac{\partial UTIL}{\partial \varepsilon} + \frac{\varepsilon}{CAP} \frac{\partial CAP}{\partial \varepsilon} + \frac{\varepsilon}{NO} \frac{\partial NO}{\partial \varepsilon} \right)$$

El que finalment porta a l'expressió:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = [\eta_{\varepsilon}(NO) + \eta_{\varepsilon}(CAP) + \eta_{\varepsilon}(UTIL)] - 1 \quad (14)$$

L'equació (14) no és més que la desagregació de l'equació (12) en diversos factors. És el mateix fer una estimació de l'elasticitat-eficiència de la demanda de treball útil d'un servei energètic que fer-la de l'elasticitat-eficiència de la demanda d'aparells convertidors d'energia, de la capacitat d'aquests aparells i de la seva utilització mitjana i realitzar una agregació d'aquestes tres elasticitats. La importància relativa d'aquestes variables pot canviar entre serveis energètics, entre regions i països i al llarg del temps.

### 3.3. L'efecte rebot com una elasticitat-preu

Com indica Sorrell (2007), un dels principals problemes a l'hora de portar a terme recerca empírica sobre l'efecte rebot és la dificultat de treballar amb dades d'eficiència energètica de serveis energètics concrets. Per una banda, hi ha un gran nombre de definicions d'eficiència energètica i dificultats en la disponibilitat de dades; per altra, hi ha el problema de que per a molts serveis energètics, les dades disponibles només proveeixen una variabilitat limitada de la variable independent de la primera definició de l'efecte rebot –en aquest cas, el paràmetre  $\varepsilon$  de equació (12)–, el que comporta una varianza molt gran de les elasticitats estimades, que al mateix temps requereix controlar els preus energètics.

Sota el supòsit de que els consumidors responen de la mateixa manera a increments –decrements– dels preus energètics que a decrements –increments– de l'eficiència energètica, altres variables independents –utilitzades en altres definicions que es veuran a l'apartat 3.3.1– com els preus dels serveis energètics ( $P_S$ ) o els preus de l'energia ( $P_E$ ), reflecteixen alhora variacions en l'eficiència energètica i en els preus, i permeten estimacions de l'efecte rebot encara que les dades disponibles d'eficiència energètica proveeixin una variació petita o inexistent de l'eficiència energètica (Sorrell, 2007).

Com es mostra a l'apartat 3.3.1, hi ha altres vies per a realitzar estimacions empíriques de l'efecte rebot. A continuació es demostra com, sota determinades hipòtesis, es poden obtenir mesures de l'efecte rebot, a partir d'estimacions d'elasticitats preu. Aquest apartat segueix els raonaments realitzats a Khazzoom (1980), Henly *et al.* (1988), Berkhout *et al.*, (2000), Dimitropoulos i Sorrell (2006) i a Sorrell (2007), entre d'altres.

### 3.3.1. Definicions de l'efecte rebot a partir de les elasticitat-preu

Seguint el raonament de l'apartat 3.2, donat que  $P_S = P_E / \varepsilon$ , un increment –decrement– de l'eficiència energètica ( $\varepsilon$ ), quan els preus energètics ( $P_E$ ) es mantenen constants, té els mateixos efectes sobre el preu energètic del treball útil ( $P_S$ ) que un decrement –increment– de la mateixa magnitud en els preus energètics, quan l'eficiència energètica es manté constant.

Així que, sota aquest supòsit, l'efecte sobre el cost total i per tant sobre la demanda de servei energètic ( $S$ ) hauria de ser simètric. Suposant que els nivells de renda i els preus dels altres béns es mantenen constants, es pot escriure la demanda de treball útil només com a funció del seu preu ( $S = f(P_S)$ ) i, per tant dels preus energètics i de l'eficiència energètica:  $S = f(P_E / \varepsilon)$ .

Aleshores, la demanda d'energia –que, de l'equació (7) es pot establir com  $E = S(P_S)/\varepsilon$  – ara vindrà donada per:  $E = f(P_E/\varepsilon)/\varepsilon$ . Assumint que els preus de l'energia són exògens –és a dir, que no depenen de l'eficiència energètica–:

$$\eta_\varepsilon(E) = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} = \frac{\varepsilon}{E} \left[ -\frac{S}{\varepsilon^2} + \frac{\partial S}{\partial P_S} \frac{\partial P_S}{\partial \varepsilon} \right] = \frac{\varepsilon}{E} \left[ -\frac{S}{\varepsilon^2} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{P_E}{\varepsilon^2} \frac{\partial S}{\partial P_S} \right] = -\frac{S}{\varepsilon E} - \frac{P_E}{\varepsilon^2 E} \frac{\partial S}{\partial P_S} = -1 - \frac{P_S}{S} \frac{\partial S}{\partial P_S}$$

el que és equivalent a:

$$\boxed{\eta_\varepsilon(E) = -\eta_{P_S}(S) - 1} \quad (15)$$

Una versió de la definició que apareix a l'equació (15) és la que ha estat utilitzada per Khazzoom (1980), Berkhout *et al.* (2000), Binswanger (2001) i Greene *et al.* (1999a) per a estimar l'efecte rebot directe, ja que resulta més senzilla d'aplicar que l'equació (12).

Sota aquests supòsits, l'elasticitat-eficiència energètica de la demanda d'energia ( $\eta_\varepsilon(E)$ ) és igual a l'elasticitat-preu de la demanda de treball útil ( $\eta_{P_S}(S)$ ), menys u. En aquesta nova definició, l'elasticitat-preu de la demanda de treball útil ( $\eta_{P_S}(S)$ ) s'utilitza com a proxi de l'elasticitat-eficiència energètica de la demanda d'energia ( $\eta_\varepsilon(E)$ ), que es correspon a la definició primària de l'efecte rebot directe.

De manera anàloga a l'equació (14), l'equació (15) es pot descompondre com es mostra a continuació:

$$\eta_\varepsilon(E) = -\left[ \eta_{P_S}(NO) + \eta_{P_S}(CAP) + \eta_{P_S}(UTIL) \right] - 1 \quad (16)$$

Donat que no sempre hi ha dades disponibles sobre eficiència energètica ( $\varepsilon$ ), –dada requerida per estimar el preu del servei energètic–, es pot utilitzar una definició alternativa de l'efecte rebot:

$$\boxed{\eta_\varepsilon(E) = -\eta_{P_E}(S) - 1} \quad (17)$$

Aquesta nova definició se sustenta sobre dues hipòtesis que cal tenir en compte:

1. Simetria: els consumidors responen de la mateixa manera a increments –decrements– dels preus energètics que a decrements –increments– en l'eficiència energètica.
2. Exogeneïtat: l'eficiència energètica no es veu afectada per canvis en els preus energètics ( $\eta_{p_E}(\varepsilon) = 0$ ).

Pel que fa la primera hipòtesi, sota determinades condicions és realista pensar que els consumidors responen de la mateixa manera a un decrement dels preus energètics que a una millora de l'eficiència, i a l'inversa, donades les millores –assumibles com a menors costos– que comporta una millora de l'eficiència. És un supòsit realista, donat que una millora de l'eficiència energètica implica, per definició, una menor quantitat d'energia per a produir la mateixa quantitat de treball útil, el que representaria una menor despesa –equivalent a un abaratiment– per la mateixa quantitat de treball útil.

La hipòtesi de que l'eficiència energètica no és afectada pels preus de l'energia també resulta raonable en períodes d'estabilitat o decreixement dels preus de l'energia, però deixa de ser certa en períodes d'increments dels preus de l'energia, on s'ha demostrat que aquests increments indueixen a millores tecnològiques no reversibles quan els preus cauen (Dargay, 1992; Grubb, 1995; Sorrell, 2007). Si canvis en els preus energètics indueixen canvis en l'eficiència energètica, la utilització d'aquesta definició pot portar a estimacions esbiaixades, ja que la variació en el preu energètic del treball útil no serà directament proporcional a la variació en els preus energètics.

El no compliment d'aquestes hipòtesis portaria a sobreestimar la dimensió de l'efecte rebot, pel que és millor realitzar estimacions de l'efecte rebot a partir d'aquesta definició en períodes on els preus de l'energia cauen o es mantenen estables.

Tal i com mostren Greening i Green (1998) també cal tenir en compte, en aquest context, que molts resultats d'estimacions empíriques suggereixen que la demanda pels serveis energètics acostumen a resultar inelàstiques:



$$-1 < \eta_{P_E}(S) < 0$$

Per motius de disponibilitat de dades, la definició que mostra l'equació (17) és sovint més utilitzada per a obtenir estimacions de l'efecte rebot directe que la definició que mostra l'equació (12), ja que en aquest cas no es requereixen dades sobre eficiència energètica.

Les dades sobre treball útil d'un determinat servei energètic també són sovint difícils d'obtenir. És més comú disposar de dades sobre la demanda d'energia del servei energètic.

Assumint que l'eficiència energètica es manté constant, donat  $P_S = P_E / \varepsilon$  i  $E = S(P_S) / \varepsilon$ :

$$\eta_{P_S}(S) = \frac{\partial S}{\partial P_S} \frac{P_S}{S} = - \frac{\partial(\varepsilon E)}{\partial(P_E/E)} \frac{P_E/E}{\varepsilon E}$$

Aleshores:

$$\eta_{P_S}(S) = \frac{\partial E}{\partial P_E} \frac{P_E}{E} = \eta_{P_E}(E)$$

El que condueix a una definició alternativa de l'efecte rebot basada en la pròpia elasticitat-preu de la demanda d'energia ( $\eta_{P_E}(E)$ ):

$$\boxed{\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_E}(E) - 1} \quad (18)$$

D'aquesta manera, sota certs supòsits, l'efecte rebot pot presentar-se aproximadament com la pròpia elasticitat-preu de la demanda d'energia per al servei energètic rellevant.

De la mateixa manera que l'equació (17) –tercera definició d'efecte rebot–, aquesta es basa en els següents supòsits:

1. Simetria: els consumidors responen de la mateixa manera a increments –decrements– dels preus energètics que a decrements –increments– en l'eficiència energètica.

2. Exogeneïtat: l'eficiència energètica no es veu afectada per canvis en els preus energètics ( $\eta_{p_E}(\varepsilon) = 0$ ).

Aquesta nova definició permet estimacions de l'efecte rebot directe de molts serveis energètics de les llars quan no es disposa de dades sobre l'eficiència energètica o el treball útil dels mateixos. El fet de poder realitzar estimacions de l'efecte rebot només a partir de dades de consum energètic a les llars i dels preus de l'energia obre un ampli ventall de possibilitats, així la consideració d'un conjunt d'estudis que han realitzat estimacions d'elasticitats preu del consum d'energia sense considerar explícitament l'efecte rebot.

En el cas que les dades sobre consum d'energia disponibles corresponguin a un conjunt de serveis energètics –com per exemple dades sobre el consum d'electricitat a les llars–, hi ha tècniques com l'anàlisi de demanda condicional que permeten assignar la proporció de consum d'energia a cada servei energètic particular (Parti i Parti, 1980).

### 3.3.2. Característiques de l'elasticitat-preu de la demanda d'energia

Espey (1998) va realitzar una metanàlisi a nivell internacional d'estudis d'elasticitats preu de la demanda de gasolina. Dahl (1993), de manera similar, va realitzar una revisió de la literatura existent sobre estudis empírics d'elasticitats preu de la demanda d'energia. De tots dos estudis es pot concloure que l'elasticitat-preu de la demanda d'energia és relativament inelàstica, amb un rang que va des de -0,3 fins a -0,9, en el llarg termini.

Aquests valors estimats suggeririen, a partir de la quarta definició de l'efecte rebot –veure equació (18)– un efecte rebot directe d'entre el 30% i el 90%, per tant, sense arribar al llindar del 100% que marcaria el punt a partir del qual es produiria "backfire".

Cal tenir en compte que l'elasticitat-preu de la demanda –i específicament de la demanda d'energia– no és un concepte universal i invariable, sinó que contràriament varia entre (Douthitt, 1989; Berkhout *et al.*, 2000):

1. Matèries primeres energètiques.
2. Serveis energètics.
3. Usos finals.
4. Països, regions i altres realitats geogràfiques.
5. Sectors i agents econòmics.
6. Adquireix diferents valors en funció s'estigui en un període de creixement dels preus energètics o de decreixement d'aquests.

Donat que les elasticitats preu de la demanda no són més que la reacció dels consumidors enfront a una variació del preu, cadascuna de les característiques descrites provoquen diferents reaccions, ja sigui en funció del producte i els seus substitutius, les necessitats subjectives dels consumidors, o altres.

Pel que fa a l'últim punt, alguns autors (Kouris, 1982; Gately, 1992, 1993; Dargay, 1992; Dargay i Gately, 1994, 1995; Haas i Schipper, 1998; Berkhout *et al.*, 2000) mostren com una altra característica de les elasticitats preu de la demanda d'energia és que tenen tendència a ser majors en períodes de preus energètics creixents que en períodes on els preus energètics decreixen. Per això, l'estimació d'elasticitats basades en sèries temporals varien en funció de si durant el període els preus de l'energia pugen o baixen (Haas i Schipper, 1998). L'explicació primària d'aquest fet és degut a la irreversibilitat de les inversions en eficiència energètica (Walker i Wirl, 1993).

Per a aquesta raó, com indica Sorrell (2007), el més adequat per a estimar l'efecte rebot directe a partir de l'estimació d'elasticitats preu de la demanda d'energia és fer-ho per a períodes d'estabilitat o decreixement dels preus energètics, ja que les estimacions basades en períodes de preus creixents sobreestimen el tamany de l'efecte. Això bàsicament és degut a què uns preus energètics majors indueixen millores tecnològiques de l'eficiència energètica no reversibles quan els preus de l'energia cauen (Grubb, 1995).

D'altra banda, com indica Grubb (1995), els requeriments d'eficiència energètica venen també expressats en regulacions que busquen que les noves inversions mantinguin uns estàndards d'eficiència elevats encara que no hi hagi l'incentiu dels preus.

De totes maneres, com es mostrarà a continuació la utilització de l'elasticitat-preu de la demanda d'energia sense consideracions addicionals, pot produir una sobreestimació de l'efecte rebot.

### 3.3.3. Principals problemes de les estimacions amb elasticitats preu

Com apunta Sorrell (2007), la utilització de les elasticitats preu com a proxy de l'efecte rebot té uns supòsits implícits que cal tenir en compte –especialment el supòsit de la simetria–. Pel que fa l'objectiu d'aquest treball, es prestarà especial importància a:

1. La correlació entre eficiència energètica i els costos de capital.
2. L'endogeneïtat de l'eficiència energètica.

#### 3.3.3.1. *Correlació entre eficiència energètica i costos de capital*

Per a determinats serveis energètics, els aparells convertidors d'energia més eficients tenen uns costos de capital més elevats que els aparells més ineficients, pel que  $K$  i  $\varepsilon$  estarien positivament correlacionats, per a d'altres serveis succeeix el contrari, és a dir hi ha una correlació negativa.

Les estimacions de l'efecte rebot a partir de les elasticitats preu de la demanda d'energia realitzades per Khazzoom (1980) han estat rebatudes per diversos autors (Besen i Johnson, 1982; Einhorn, 1982; Henly *et al.*, 1988; Lovins *et al.*, 1988; Brannlund *et al.*, 2005) degut a l'omissió que va fer dels costos de capital, que podria conduir a sobreestimacions de l'efecte rebot.

Seguint el desenvolupament realitzat per Henly *et al.* (1988), si s'assumeix que els costos de capital són una funció de l'eficiència energètica i que el consum d'energia depèn

d'aquests costos, l'equació (7) es transforma en:  $E = f[P_E/\varepsilon, P_K(\varepsilon)]/\varepsilon$ . Aleshores agafant derivades parcials respecte l'eficiència energètica:

$$\frac{\partial E}{\partial \varepsilon} = -\frac{S}{\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} = -\frac{S}{\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial S}{\partial P_S} \frac{\partial P_S}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial S}{\partial P_K} \frac{\partial P_K}{\partial \varepsilon} \right] = -\frac{S}{\varepsilon^2} - \frac{P_E}{\varepsilon^3} \frac{\partial S}{\partial P_S} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial S}{\partial P_K} \frac{\partial P_K}{\partial \varepsilon}$$

Multiplicant per  $\varepsilon/E$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} &= -\frac{S}{\varepsilon E} - \frac{P_E}{\varepsilon^2 E} \frac{\partial S}{\partial P_S} + \frac{1}{E} \frac{\partial S}{\partial P_K} \frac{\partial P_K}{\partial \varepsilon} = -1 - \frac{P_E/\varepsilon}{\varepsilon E} \frac{\partial S}{\partial P_S} + \frac{1}{E} \frac{\partial S}{\partial P_K} \frac{\partial P_K}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} &= -1 - \frac{P_S}{S} \frac{\partial S}{\partial P_S} + \frac{\varepsilon}{S} \frac{\partial S}{\partial P_K} \frac{\partial P_K}{\partial \varepsilon} \end{aligned}$$

El que condueix a la següent definició alternativa de l'elasticitat-eficiència energètica de la demanda d'energia:

$$\boxed{\eta_\varepsilon(E) = -\left[\eta_{P_S}(S) - \left(\eta_{P_K}(S) \eta_\varepsilon(P_K)\right)\right] - 1} \quad (19)$$

L'equació (19) mostra com, en el cas que existeixi una correlació positiva entre eficiència energètica i costos de capital, l'efecte rebot resultarà menor que les estimacions realitzades a partir de la definició de l'equació (15). En cas contrari, resultarà major. La variable a considerar en els costos de capital tindria més a veure amb els costos anualitzats dels aparells que amb els costos inicials, és a dir, els costos descomptats per la seva vida útil, els quals dependrien de les preferències temporals dels consumidors i de la vida útil dels aparells.

En general (Sorrell, 2007), la magnitud i direcció de l'efecte rebot, estimat a partir de les definicions que mostren les equacions (15), (17) i (18) dependrà del grau i signe de la correlació entre l'eficiència energètica i la resta de categories de costos implicats per a proveir el servei energètic –incloent-hi els costos de capital i els operatius i de manteniment–. Si estan positivament correlacionats, el biaix serà negatiu i l'efecte rebot directe estarà sobreestimat, mentre que si estan negativament correlacionats el biaix serà positiu i l'efecte rebot estarà infraestimat.

### 3.3.3.2. Endogeneïtat de l'eficiència energètica

Fins el moment s'ha considerat l'eficiència energètica com una variable exògena, és a dir, que és independent de la resta de variables independents, però en realitat l'eficiència energètica hauria de ser considerada, en part, endògena.

Com mostren Green *et al.* (1999) i Small i Van Dender (2005), l'eficiència energètica és funció dels preus actuals i passats ( $\varepsilon = f(P_{E,t-i})$ ). Això és degut a que, a curt termini, l'increment dels preus de les matèries primeres energètiques fa que els consumidors utilitzin els aparells de que disposen de manera més eficient per a mantenir el cost. A llarg termini, l'increment de preus incentiva als consumidors a comprar aparells convertidors més eficients i als productors a fer una major despesa en R+D per tal de respondre a les expectatives dels consumidors.

Considerant l'endogeneïtat de l'eficiència energètica, l'equació (7) quedaria com:  $E = f[P_E / \varepsilon(P_E)] / \varepsilon(P_E)$ . Diferenciant aquesta equació pels preus energètics i substituint l'expressió per  $\eta_{P_S}(S)$  a la definició de l'equació (15), s'obté una definició alternativa de l'efecte rebot que té en compte les millores de l'eficiència energètica induïdes pels preus:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = - \left[ \frac{\eta_{P_E}(E) + \eta_{P_E}(\varepsilon)}{1 - \eta_{P_E}(\varepsilon)} \right] - 1 \quad (20)$$

Diferents versions de l'equació (20) es troben a Blair *et al.* (1984), Mayo i Mathis (1988), Greene *et al.* (1999b) i a Small i Van Dender (2005).

### 3.3.4. La millor aproximació per a determinar la magnitud de l'efecte rebot directe d'un servei energètic

Com demostren Hanly *et al.* (2002) en un estudi sobre elasticitats preu de la demanda del transport, la magnitud relativa de cadascuna de les diferents elasticitats mostrades en l'apartat 3.3, per a un servei energètic particular, és la que es mostra a continuació.

Començant per la següent derivació de l'equació (7):  $E = S[P_E / \varepsilon(P_E)] / \varepsilon(P_E)$ , l'elasticitat-preu de la demanda de treball útil es pot expressar com:

$$\eta_{P_S}(S) = \frac{P_S}{S} \frac{\partial S}{\partial P_S} = \frac{P_S}{S} \left[ \varepsilon \frac{\partial S}{\partial P_S} + E \frac{\partial \varepsilon}{\partial P_S} \right] = \frac{P_S}{E} \frac{\partial E}{\partial P_S} + \frac{P_S}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial P_S}$$

o bé:

$$\eta_{P_S}(E) = \eta_{P_S}(S) - \eta_{P_S}(\varepsilon)$$

suposant que es compleix la hipòtesi de que  $\eta_{P_S}(\varepsilon) \geq 0$ , és a dir que un major cost del treball útil incentivi una major eficiència energètica, i que  $\eta_{P_S}(S) \leq 0$ , és a dir, que uns preus majors redueixin la demanda de treball útil, aleshores:

$$|\eta_{P_S}(S)| \leq |\eta_{P_S}(E)| \quad (21)$$

De manera anàloga es pot obtenir que  $\eta_{P_E}(E) = \eta_{P_E}(S) - \eta_{P_E}(\varepsilon)$ , i per tant que:

$$|\eta_{P_E}(S)| \leq |\eta_{P_E}(E)| \quad (22)$$

A partir de l'equació (20), corresponent a la definició de l'efecte rebot que considera endogeneïtat de l'eficiència energètica, podem obtenir la següent expressió:  $\eta_{P_E}(E) = \eta_{P_S}(S)[1 - \eta_{P_E}(\varepsilon)] - \eta_{P_E}(\varepsilon)$ . Suposarem que el valor de l'elasticitat-preu de l'energia respecte l'eficiència energètica està entre 0 i 1:  $0 \leq \eta_{P_E}(\varepsilon) \leq 1$ , i que l'elasticitat-preu del treball útil respecte la demanda de treball útil està entre -1 i 0:  $-1 \leq \eta_{P_S}(S) \leq 0$ . Aleshores:

$$|\eta_{P_S}(S)| \leq |\eta_{P_E}(E)| \quad (23)$$

Finalment, combinant les expressions (21), (22) i (23), s'obté:

$$|\eta_{P_E}(S)| \leq |\eta_{P_S}(S)| \leq |\eta_{P_E}(E)| \leq |\eta_{P_S}(E)| \quad (24)$$

Com indiquen Hanly *et al.* (2002), aquesta relació és un important punt de referència per a l'evidència empírica existent sobre les estimacions economètriques sobre l'efecte rebot. Aquesta relació també mostra com la gran literatura existent sobre estimacions d'elasticitats del preu de la demanda d'energia ( $\eta_{P_E}(E)$ ) poden ser interpretades com a

límit superior de la magnitud de l'efecte rebot directe. A continuació, la Taula 5 exposa, a mode de resum, les diverses definicions de l'efecte rebot directe que han anat apareixent, a partir de l'estimació d'elasticitats.

Taula 5. Resum de definicions de l'efecte rebot directe a partir de l'estimació d'elasticitats

Definició d'efecte rebot	Formalització matemàtica
1. Definició matemàtica –de l'enginyeria–	$\eta_{\varepsilon}(E) = \eta_{\varepsilon}(S) - 1$
2. Definició “econòmica”	$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_S}(S) - 1$
3. Primera aproximació –a través del preu de l'energia–	$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_E}(S) - 1$
4. Segona aproximació –a través del preu de l'energia i la demanda d'energia–	$\eta_{\varepsilon}(E) = -\eta_{P_E}(E) - 1$

Nota: el símbol  $\eta$  representa l'elasticitat,  $\varepsilon$  és l'eficiència energètica,  $E$  és la demanda d'energia,  $S$  és la demanda de treball útil,  $P_S$  és el preu del treball útil,  $P_E$  és el preu de l'energia.

Font: adaptació de Sorrell (2007).

A mode de resum, si les millores d'eficiència energètica estan associades amb variacions en els costos de capital –equació (19)– i si l'eficiència energètica està influenciada pels preus energètics –és a dir, existeix endogeneïtat, equació (20)–, l'expressió més apropiada per a estimar la magnitud de l'efecte rebot, a partir d'una adaptació de la que mostra Sorrell (2007), seria:

$$\eta_{\varepsilon}(E) = - \left[ \left( \frac{\eta_{P_E}(E) + \eta_{P_E}(\varepsilon)}{1 - \eta_{P_E}(\varepsilon)} \right) - \left( \eta_{P_K}(S) \eta_{\varepsilon}(P_K) \right) \right] - 1 \quad (25)$$

Addicionalment, alguns autors argumenten l'existència d'un efecte rebot respecte del temps (Binswanger, 2001; Sorrell, 2007), ja que la major demanda d'un determinat servei energètic pot produir un augment del temps destinat al seu consum. Si bé aquest raonament és cert per a determinats serveis energètics com el transport privat, perd validesa per a altres serveis energètics per als quals un increment en la seva demanda no implica un increment significatiu del temps dedicat al seu consum –com per exemple la calefacció o la refrigeració domèstiques–.



#### **4. VARIABLES I DADES UTILITZADES**

En aquest capítol i els posteriors es desenvolupa l'anàlisi empírica realitzada per tal d'obtenir una aproximació de l'efecte rebot directe a les llars a Catalunya. Concretament s'ha realitzat una estimació de l'efecte rebot per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars catalanes i una altra estimació de l'efecte rebot per a refrigeració –climatització– domèstica. No es té constància de cap estudi que realitzi una estimació de l'efecte rebot directe a Catalunya ni a Espanya.

Un dels principals problemes detectats durant la recerca ha estat la dificultat en l'obtenció de dades, especialment les que fan referència al consum d'energia dels serveis energètics concrets de les llars, dades sobre eficiència energètica o dades sobre treball útil. La inexistència o poca fiabilitat d'algunes dades ha fet que les estimacions econòmriques que es realitzen en l'apartat 5 s'hagin fet a partir de les derivacions analitzades en el capítol 3, concretament, a partir d'estimacions d'elasticitats preu de la demanda d'energia per als serveis energètics analitzats.

En aquest capítol es descriuran les variables obtingudes en la fase de recerca de dades, que han estat necessàries per realitzar posteriorment les anàlisis econòmriques.

##### **4.1. Consum d'energia elèctrica**

La demanda d'energia elèctrica és la variable clau a explicar –serà la variable endògena– en les estimacions de les elasticitats preu, a partir de les quals s'obindrà una aproximació de l'efecte rebot directe que es vol estimar a Catalunya.

###### **4.1.1. Consum municipal d'energia elèctrica a les llars**

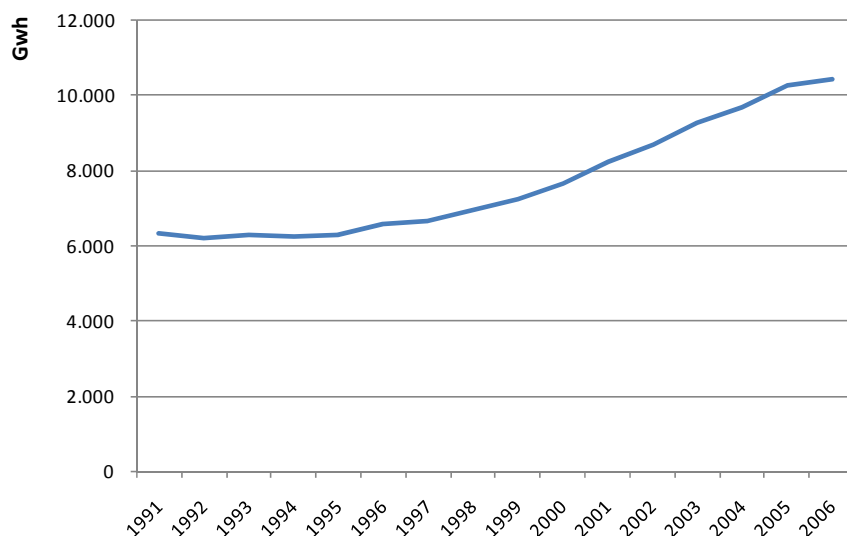
S'ha obtingut de l'Institut Català de l'Energia (ICAEN) una sèrie anual pel període que va des del 1992 al 2002 del consum d'energia elèctrica municipal –de gairebé tots els

municipis de Catalunya– a les llars. Aquesta és una valuosa font d'informació donat que mostra la variabilitat temporal –al llarg del temps– i transversal –entre municipis– de la variable considerada. Aquesta informació resulta útil per a obtenir estimacions a partir de dades de panell, les quals proporcionen resultats més robustos que les estimacions únicament amb sèries temporals o amb dades transversals, per la gran quantitat d'informació incorporada a les estimacions.

#### 4.1.2. Consum a Catalunya d'energia elèctrica a les llars

D'altra banda, i donat que la informació municipal no es disposa per a la totalitat de Catalunya, s'han obtingut de l'ICAEN dades del consum total anual d'energia elèctrica a les llars a Catalunya pel període que va des del 1991 al 2006. El Gràfic 5 mostra l'evolució d'aquesta variable.

Gràfic 5. Evolució del consum anual d'energia elèctrica a les llars catalanes, 1991-2006

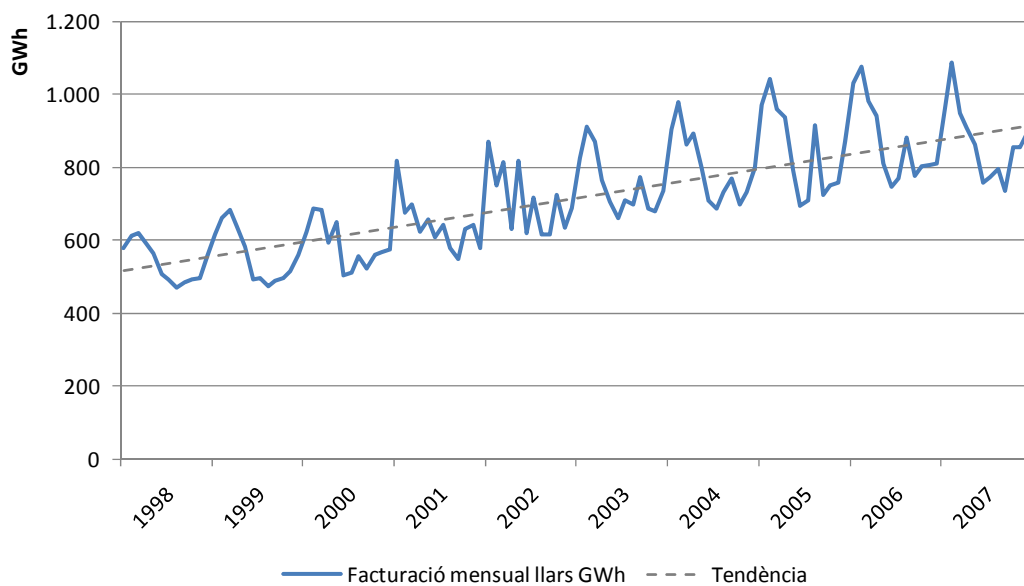


Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Institut Català d'Energia. Departament d'Economia i Finances.

S'observa com, durant el període en consideració, el consum total d'energia elèctrica a les llars ha experimentat una tendència creixent i com aquest creixement s'ha accentuat els darrers anys.

D'altra banda, s'han obtingut de l'IDESCAT dades de la facturació mensual d'energia elèctrica a les llars a Catalunya pel període que va del gener del 1998 al desembre del 2007. Malgrat els totals anuals de les dues fonts difereixen lleugerament en els resultats, aquestes últimes dades permeten observar la gran variabilitat intermensual que es produeix en el consum elèctric domèstic –veure Gràfic 6–.

Gràfic 6. Evolució del consum mensual d'energia elèctrica a les llars catalanes, 1998-2007.



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Institut d'Estadística de Catalunya.

S'observa com els mesos més freds de l'any –aproximadament d'octubre a març–, el consum d'energia elèctrica és major que els mesos més calorosos de l'any. Aquest esquema es repeteix, en major o menor mesura, tots els anys i indica la importància que té el consum elèctric per a calefacció a les llars, tot i que també reflecteix altres aspectes com que durant els mesos més freds es passa més temps a l'interior de les llars, incrementant el consum energètic global o la menor quantitat de llum natural durant el mateix període. Aquesta variabilitat s'accentua els últims anys del període analitzat.

#### 4.1.3. Consum a Catalunya d'energia elèctrica en refrigeració per a climatització domèstica

Addicionalment al consum total anual d'energia elèctrica a les llars, s'ha pogut derivar la part d'aquest consum elèctric destinat a la refrigeració de les llars.

Per una banda s'ha obtingut de l'ICAEN dades anuals de la proporció total d'energia elèctrica de les llars destinada a refrigeració domèstica a Catalunya des del 1997 fins al 2006. Per altra banda, s'ha obtingut del mateix organisme, dades del consum total d'energia elèctrica a les llars a Catalunya, pels mateixos anys.

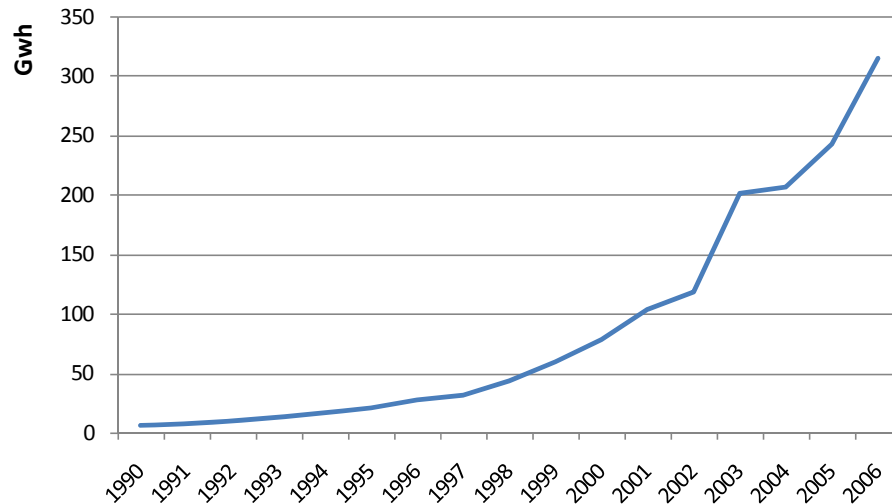
Aplicant la proporció corresponent al consum total, s'ha obtingut el consum energètic domèstic anual per a refrigeració a Catalunya pel període 1997-2006. Donada la definida tendència exponencial que mostra l'evolució d'aquest consum, s'ha extrapolat aquest consum pel període que va de 1990 a 1996 a partir de l'equació  $Y = 27,14 * \exp(0,25 * x)$  que ajusta les dades amb un  $R^2$  de 0,984.<sup>5</sup>

Tenint en compte que la refrigeració domèstica només utilitza energia elèctrica, s'ha suposat que tot el consum resultant és d'electricitat. El Gràfic 7 mostra l'evolució d'aquest consum a Catalunya.

---

<sup>5</sup> Addicionalment, s'ha constatat aquesta tendència exponencial que ha seguit el consum d'energia per refrigeració domèstica durant el període extrapolat, a partir de converses amb tècnics experts de l'ICAEN.

Gràfic 7. Evolució del consum elèctric per a refrigeració a les llars a Catalunya. Període 1990-2006



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'Institut Català d'Energia. Departament d'Economia i Finances.

S'observa l'important creixement que ha experimentat el consum d'energia per a refrigeració a les llars durant el període en consideració, especialment pels darrers anys. Aquest ha estat un període de gran expansió de la refrigeració domèstica a Catalunya, on ha passat de ser un servei energètic "de luxe" a estar molt més a l'abast de la població, i on encara, la població es trobava lluny del nivell màxim de confort tèrmic, o efecte "saciació" –com indica el Pla de l'energia de Catalunya 2006-2015 (Departament de Treball i Indústria, 2006)–. Això provocaria estimacions elevades de l'efecte rebot per aquesta via, en aquest àmbit, per al període en consideració.

També cal tenir en compte que, malgrat el gran creixement que ha experimentat el consum d'energia d'aquest ús, aquest encara representa una minsa proporció del consum total d'energia a les llars –veure Gràfic 3–.

## 4.2. Preus de l'energia

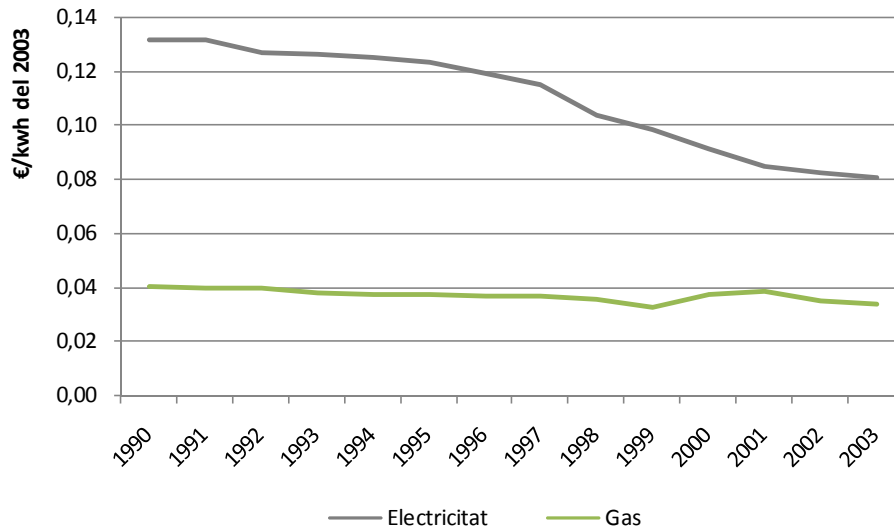
Per a obtenir estimacions de l'efecte rebot directe, a partir d'estimacions econòmriques, segons el desenvolupament analític del capítol 3 –és a dir, estimant elasticitats-preu de la demanda d'energia pel servei energètic–, una de les variables clau és el preu de l'energia. Donat que les dades de consum energètic que es disposa són de consum d'electricitat a les llars, la variable clau en aquest cas seria el preu de l'electricitat i dels seus possibles substitutius, com el gas.

El mercat de l'electricitat és un mercat regulat a Espanya. En un període determinat hi ha el mateix preu marginal de l'electricitat a tota la geografia espanyola. Això fa que no es produeixi variabilitat entre municipis –o entre comunitats autònomes–, el que dificultaria realitzar estimacions de l'elasticitat-preu de la demanda d'electricitat a través d'una anàlisi purament transversal –*cross-section*–.

S'han obtingut les tarifes tant de l'electricitat com del gas, per a usuaris domèstics a partir d'una revisió dels Boletín Oficial del Estado (BOE), analitzant els Reials Decrets on surten regulades les tarifes corresponents.

D'aquesta manera s'han calculat les mitjanes anuals de les tarifes marginals tant d'electricitat com de gas del mateix període pels que es disposa dades de consums d'electricitat total a les llars i consum d'electricitat per a refrigeració. El Gràfic 8 mostra l'evolució de la mitjana de la tarifa marginal anual d'electricitat i de gas aplicada als usuaris domèstics durant el període de referència.

Gràfic 8. Evolució de la mitjana anual de la tarifa marginal d'electricitat i de gas natural aplicada a les llars –en euros constants del 2003–, 1990-2003.



Font: elaboració pròpia a partir de diversos BOE.

S'observa com, a preus constants del 2003, la tarifa d'electricitat té una tendència decreixent durant el període analitzat, especialment l'última meitat del període. La tarifa de gas manté una tendència constant.

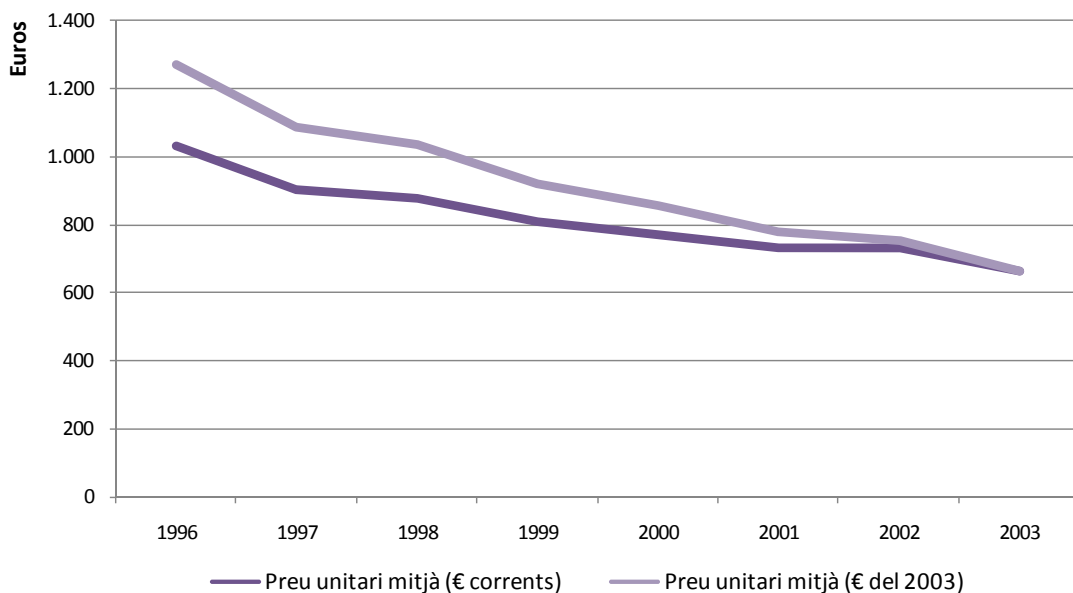
La utilització d'aquesta variable en les estimacions econòmriques de l'efecte rebot a partir de l'estimació d'elasticitats-preu proporcionaria uns resultats que sembla que no conduirien, per aquesta via, a una sobreestimació de l'efecte, donat que, com s'exposa amb més detall a l'apartat 2.2, la hipòtesi de què l'eficiència energètica no és afectada pels preus de l'energia –necessària per a derivar l'efecte rebot de les elasticitats preu– no és certa en períodes d'increments dels preus de l'energia, ja que aquests increments indueixen a millores tecnològiques no reversibles (Dargay, 1992; Grubb, 1995; Sorrell, 2007).

La tarifa de gas, en canvi, té una tendència constant durant tot el període, el que fa pensar que tampoc induiria progressos tecnològics, i també resultaria útil a efectes de ser utilitzada a les estimacions.

#### 4.3. Preu dels aparells de refrigeració domèstica

S'ha calculat l'evolució del preu mitjà dels aparells de refrigeració domèstica pel període 1996 - 2003. S'ha obtingut un preu mitjà anual a partir de dades de facturació total anual d'aparells domèstics d'aire condicionat i del número total d'unitats domèstiques venudes a Espanya, de l'Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización (AFEC). El Gràfic 9 mostra l'evolució d'aquest preu.

Gràfic 9. Evolució del preu unitari mitjà dels aparells domèstics d'aire condicionat a Espanya, 1996-2003.



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'AFEC.

S'observa clarament una tendència decreixent del preu unitari mitjà dels aparells domèstics de refrigeració a Espanya, fet que hauria pogut incentivar una major penetració d'aquest tipus d'aparells a les llars i consegüentment augmentar el consum d'energia realitzat en aquest servei energètic. Això proporcionaria unes elevades estimacions de l'efecte rebot per la via dels consumidors "marginals", és a dir, aquella proporció de la població que anteriorment no podia accedir al servei energètic i ara en pot disposar per l'abaratiment del cost dels aparells.



Malgrat això, no s'han pogut obtenir per a aquesta variable dades d'anys anteriors a 1996 que permetrien la inclusió d'aquesta variable en les anàlisis econòmriques anuals, considerant, a més dels costos energètics, els costos de capital. La no inclusió dels costos de capital provocaria una infraestimació de l'efecte rebot, si aquests són decreixents amb la millora de l'eficiència, a l'hora de derivar-lo per la via de l'estimació d'elasticitats-preu –veure apartat 3.3.3.1–.

#### 4.4. Variables climàtiques

Un aspecte important a l'hora de realitzar estimacions del consum energètic a les llars és controlar els efectes climàtics. Això és degut a la importància que té el clima sobre el consum energètic per a climatitzar la llar –especialment en calefacció–. Donades les dificultats d'establir un criteri per a considerar les condicions climàtiques en les estimacions econòmriques, s'ha optat per a calcular, per al període d'anàlisi considerat, els graus-dia de calefacció (HDD, en anglès, *heating degree-days*) i de refrigeració (CDD, en anglès, *cooling degree-days*) a Catalunya, ja que és una variable àmpliament utilitzada en la literatura empírica sobre estimacions de l'efecte rebot, per la seva capacitat de recollir els aspectes climàtics que afecten el consum d'energia a les llars.

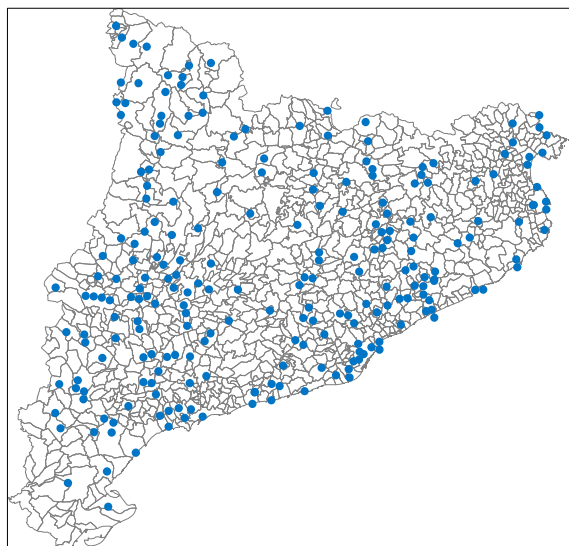
Els graus-dia són una mesura del número de graus centígrads –o altres– en què diàriament no s'arriba –per a calefacció–, o bé se supera –per a refrigeració– un llindar de temperatura prèviament establert.<sup>6</sup> Per al seu càlcul s'han obtingut dades de l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) de les temperatures màximes i mínimes diàries de 244 estacions meteorològiques repartides per la geografia catalana, pel període 1990-2003. Els llindars –temperatura base ( $T_{base}$ )– que s'han establert, han estat de 21 °C per a calefacció i de 15 °C per a refrigeració. Aquestes són les temperatures de referència per a

---

<sup>6</sup> Per a més informació sobre graus-dia, mètodes de càlcul i una aplicació a Catalunya, veure Margarit *et al.* (2003).

la determinació dels graus-dia segons la norma UNE relativa a les condicions climàtiques per a projectes.

Gràfic 10. Estacions meteorològiques de les quals es disposa de dades



Per al càlcul dels graus-dia de calefacció s'han utilitzat les fórmules de la Taula 6, mentre que per al càlcul dels graus-dia per a refrigeració s'han utilitzat les fórmules de la Taula 7.

Taula 6. Càlcul dels graus-dia calefacció a Catalunya segons la condició que es produeixi.

Condició	Fórmula utilitzada
$T_{\min} > T_{\text{base}}$	$\text{HDD} = 0$
$(T_{\max} + T_{\min})/2 > T_{\text{base}}$	$\text{HDD} = (T_{\text{base}} - T_{\min})/4$
$T_{\max} \geq T_{\text{base}}$	$\text{HDD} = (T_{\text{base}} - T_{\min})/2 - (T_{\max} - T_{\text{base}})/4$
$T_{\max} < T_{\text{base}}$	$\text{HDD} = T_{\text{base}} - (T_{\max} + T_{\min})/2$

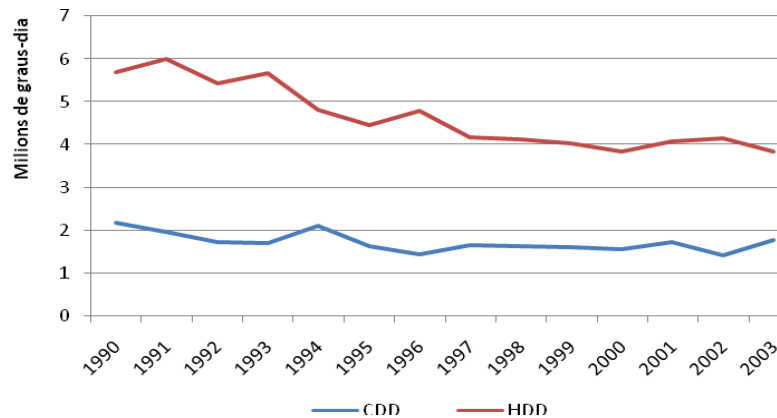
Taula 7. Càlcul dels graus-dia refrigeració a Catalunya segons la condició que es produeixi.

Condició	Fórmula utilitzada
$T_{\max} < T_{\text{base}}$	$\text{CDD} = 0$
$(T_{\max} + T_{\min})/2 < T_{\text{base}}$	$\text{CDD} = (T_{\max} - T_{\text{base}})/4$
$T_{\min} \leq T_{\text{base}}$	$\text{CDD} = (T_{\max} - T_{\text{base}})/2 - (T_{\text{base}} - T_{\min})/4$
$T_{\min} > T_{\text{base}}$	$\text{CDD} = (T_{\max} + T_{\min})/2 - T_{\text{base}}$

A partir d'aquests càlculs s'han obtingut els graus-dia obtinguts a cada estació meteorològica al llarg de cada any analitzat, mitjançant una agregació d'aquests s'ha

obtingut una mesura dels graus-dia calefacció i refrigeració a Catalunya. El Gràfic 11 mostra l'evolució de les dues variables.

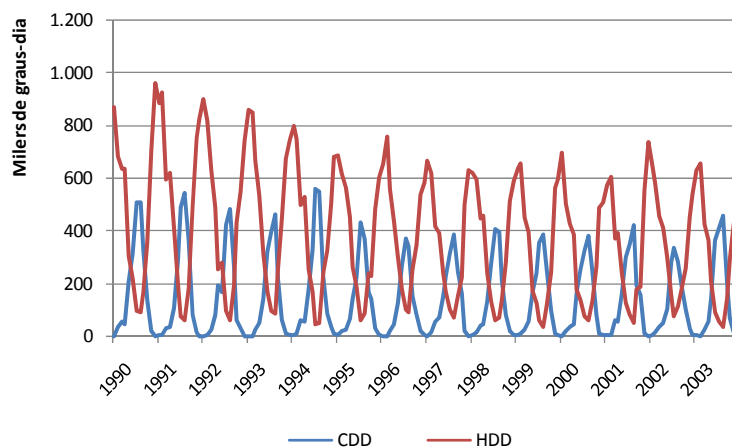
Gràfic 11. Evolució anual dels graus-dia calefacció i refrigeració a Catalunya, 1990-2003.



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'AEMET.

A continuació, el Gràfic 12 mostra l'evolució mensual dels graus-dia de calefacció i de refrigeració a Catalunya. Aquesta mostra detalladament la gran variabilitat intermensual que es produeix en aquestes variables, fet no observable en una anàlisi anual.

Gràfic 12. Evolució mensual dels graus-dia calefacció i refrigeració a Catalunya, 1990-2003.



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'AEMET.

S'observa com en els mesos més freds de l'any –aproximadament d'octubre a març– es produeix un increment considerable dels graus-dia calefacció i un decrement dels graus-dia refrigeració, mentre que durant els mesos més calorosos –aproximadament d'abril a setembre– succeeix el contrari.

#### **4.5. Renda de les famílies**

Tal i com indica la literatura, una altra variable necessària per a portar a terme estimacions de l'efecte rebot és la renda de les famílies. Aquesta variable permet controlar aspectes relacionats amb l'evolució del benestar, així com l'increment del consum elèctric degut al major nombre d'aparells elèctrics i electrònics a les llars. Addicionalment, la inclusió d'aquesta variable en les estimacions permet l'obtenció i anàlisi d'elasticitats-renda.

##### **4.5.1. Renda Familiar Disponible Bruta (RFDB) municipal**

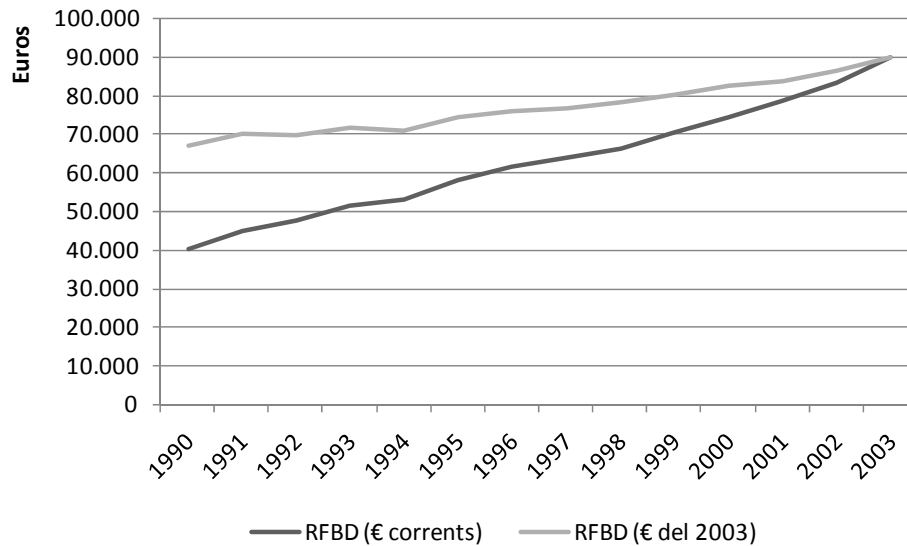
S'han obtingut de l'IDESCAT dades sobre la RFDB de gairebé la totalitat dels municipis majors de 5.000 habitants de Catalunya pels anys 1991, 1996 i pel període 1999-2002. Per a obtenir la RFDB per a la resta d'anys s'ha realitzat una extrapolació per a cada municipi. Donat que l'evolució de la renda dels municipis té un comportament molt regular, les estimacions resultants no desvien la renda en cap sentit i resulten creïbles.

##### **4.5.2. Renda Familiar Disponible Bruta (RFDB) a Catalunya**

S'han obtingut dades de la RFDB de Catalunya de l'IDESCAT pel període 2000-2005 en base 2000; del període 1995-2002, en base 1995; i del període 1990-1995, en base 1986. Donat que no es disposa d'una sèrie completa del període d'anàlisi (1990-2003) en una mateixa base, s'han enllaçat les sèries segons el procediment indicat per l'IDESCAT per a obtenir una sèrie pel període 1990-2003 en base 2000. Aquest procediment consisteix en

aplicar les taxes de variació interanuals retrospectives a partir de la darrera sèrie disponible –veure Gràfic 13–.

Gràfic 13. Evolució de la RFBD a Catalunya, 1990-2003. Base 2000.



Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'IDESCAT.

S'observa un creixement sostingut de la renda de les famílies durant el període d'anàlisi, tot i que en termes reals aquest ha estat menor. Aquest fet podria influenciar les estimacions sobre l'efecte rebot a partir d'estimacions d'elasticitats-preu de la demanda d'electricitat.

## 5. MODEL ECONOMÈTRIC

Seguint a Khazzoom (1980), en l'anàlisi empírica es limitarà el significat de l'efecte rebot directe al nivell microeconòmic. En aquest nivell, una millora tecnològica en el consum d'energia reduiria, *ceteris paribus*, el preu dels serveis energètics proporcionats pels aparells que han millorat l'eficiència. Com s'ha analitzat al capítol 3, des de que Khazzoom ho va suggerir el 1980, molts economistes han utilitzat l'elasticitat-preu de la demanda d'energia com una bona variable proxy de l'efecte rebot. Aquesta variable permet portar a terme una estimació indirecta de l'efecte rebot, és a dir, sense necessitat de dades d'eficiència energètica.

Donada la disponibilitat de dades, i com indiquen Haas i Biermayr (2000), les elasticitats-preu i renda es poden estimar utilitzant la següent funció de demanda d'elasticitats constants –a partir d'especificar una forma funcional doble-logarítmica– dinàmica estàndard. De manera simplificada i genèrica es pot formalitzar com:

$$\ln E_t = \mu + \beta_1 \ln P_t + \beta_2 \ln Y_t + \beta_3 \ln HDD_t + \beta_4 \ln E_{t-1} \quad (26)$$

on  $E_t$  és el consum d'energia del període  $t$ ,  $P_t$  és el preu de l'energia el període  $t$ ,  $Y$  és la variable de renda,  $HDD$  és la variable de temperatura –en aquest cas els graus-dia de calefacció i/o refrigeració– i  $E_{t-1}$  és el consum d'energia del període  $t-1$ . Aquesta última variable captura els efectes a llarg termini.

En aquest capítol s'ha realitzat l'estimació de l'efecte rebot directe per dues vies, en primer lloc s'ha estimat l'efecte rebot per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars i per a la refrigeració per a climatització domèstica, amb una sèrie anual de dades agregades pel conjunt de Catalunya. Posteriorment, s'ha realitzat una estimació de l'efecte rebot per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars amb dades de panell d'un conjunt de municipis de Catalunya. El fet que els preus de l'electricitat no variïn entre municipis no ha permès realitzar una anàlisi *cross-section*.

### 5.1. Estimacions de l'efecte rebot amb dades de tot Catalunya

En primer terme s'han realitzat dues estimacions amb dades agregades per a tot Catalunya. La primera estimació s'ha realitzat pel conjunt de serveis energètics que utilitzen energia elèctrica a les llars a Catalunya pel període 1991-2003, amb la forma funcional que mostra l'equació 27.

$$\ln E_{Elec_t} = \mu + \beta_1 \ln P_{E_t} + \beta_2 \ln RFDB_t + \beta_3 \ln HDD_t + \beta_4 \ln E_{Elec_{t-1}} \quad (27)$$

On  $E_{Elec_t}$  és el consum d'energia elèctrica a les llars l'any  $t$ ,  $P_{E_t}$  és la mitjana anual del preu marginal de l'electricitat domèstica l'any  $t$ ,  $RFDB_t$  és la Renda Familiar Disponible Bruta l'any  $t$ ,  $HDD_t$  són els graus-dia de calefacció de l'any  $t$ , i  $E_{Elec_{t-1}}$  és consum d'energia elèctrica a les llars l'any  $t-1$ .

La segona estimació s'ha fet per a la climatització domèstica, estimant el consum d'electricitat utilitzat per a refrigeració domèstica a Catalunya pel període 1991-2003, amb la forma funcional que mostra l'equació 28:

$$\ln E_{R_t} = \mu + \beta_1 \ln P_{E_t} + \beta_2 \ln RFDB_t + \beta_3 \ln CDD_t + \beta_4 \ln E_{R_{t-1}} \quad (28)$$

On  $E_{R_t}$  és el consum d'energia elèctrica per a refrigeració a les llars l'any  $t$ ,  $P_{E_t}$  és la mitjana anual del preu marginal de l'electricitat de l'electricitat domèstica l'any  $t$ ,  $RFDB_t$  és la Renda Familiar Disponible Bruta l'any  $t$ ,  $CDD_t$  són els graus-dia de refrigeració de l'any  $t$ , i  $E_{R_{t-1}}$  és consum d'energia elèctrica a les llars l'any  $t-1$ .

A continuació, la Taula 8 mostra els resultats de l'estimació per Mínims Quadrats Ordinaris (MQO) de la demanda total d'energia elèctrica a les llars.

Taula 8. Estimació de la demanda total d'energia elèctrica a les llars. Dades agregades de Catalunya.

Dependent Variable:  $\ln(E_{Elec_t})$

Sample (adjusted): 1992 2003

Included observations: 12 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
$\ln(P_{E_t})$	-0,207442	0,054912	-3,777688	0,0069
$\ln(RFDB_t)$	0,382543	0,045388	8,428386	0,0001
$\ln(HDD_t)$	0,155599	0,037655	4,132185	0,0044
$\ln(E_{Elec_{t-1}})$	0,600241	0,069698	8,612035	0,0001
$\mu$	-3,562908	0,761442	-4,679158	0,0023
R-squared	0,998634	Mean dependent var		8,869514
Adjusted R-squared	0,997853	S,D, dependent var		0,140705
S.E. of regression	0,006520	Akaike info criterion		-6,933671
Sum squared resid	0,000298	Schwarz criterion		-6,731626
Log likelihood	46,60202	F-statistic		1279,140
Durbin-Watson stat	3,041650	Prob(F-statistic)		0,000000

A continuació, la Taula 9 mostra els resultats de l'estimació per Mínims Quadrats Ordinaris de la demanda d'energia elèctrica per a refrigeració a les llars.



Taula 9. Estimació de la demanda total d'energia elèctrica per a refrigeració a les llars.  
Dades agregades de Catalunya.

Dependent Variable:  $\ln(E_{R_t})$

Sample: 1991 2003

Included observations: 13

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
$\ln(P_{E_t})$	-0,864602	0,189781	-4,555780	0,0014
$\ln(RFDB_t)$	4,623342	0,072094	64,12928	0,0000
$\ln(CDD_t)$	0,506111	0,126832	3,990415	0,0032
$\mu$	-56,92428	2,204937	-25,81674	0,0000
R-squared	0,998893	Mean dependent var		3,568302
Adjusted R-squared	0,998524	S.D. dependent var		1,022394
S.E. of regression	0,039283	Akaike info criterion		-3,388383
Sum squared resid	0,013888	Schwarz criterion		-3,214552
Log likelihood	26,02449	F-statistic		2706,468
Durbin-Watson stat	2,295961	Prob(F-statistic)		0,000000

Nota: finalment no s'ha inclòs la variable  $E_{R_{t-1}}$  en les estimacions, ja que no resultava significativa.

S'observa com els coeficients estimats de les dues estimacions resulten significatius, tant de manera individual com conjunta i els coeficients de determinació són propers a la unitat. L'estimació realitzada pel conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars podria presentar problemes d'autocorrelació.

Caldria realitzar una anàlisi de les arrels unitàries de les sèries i transformar-les, si fos necessari, per a assegurar que fossin estacionàries, però les poques observacions anuals amb les que s'han realitzat les estimacions fan que aquesta anàlisi resulti impracticable.

De les estimacions resulten unes elasticitats preu de la demanda de -0,21 a curt termini i de -0,52 a llarg termini pel que fa la demanda total d'electricitat a les llars. Pel que fa la demanda d'energia elèctrica per a refrigeració s'ha obtingut una elasticitat-preu de la demanda a llarg termini de -0,86.

Aquests resultats portarien a unes estimacions de l'efecte rebot directe del 21% a curt termini i del 52% a llarg termini, pel que fa el conjunt de serveis energètics que consumeixen electricitat a les llars, és a dir, una millora de l'eficiència energètica global que potencialment hagués de reduir la demanda d'energia d'electricitat un 10% en aquests serveis energètics, portaria a una reducció efectiva de la demanda d'energia del 7,9% en el curt termini i del 4,8% en el llarg termini; o el que és el mateix, el 21% –i el 52%, en el llarg termini– dels estalvis potencials del consum d'electricitat derivats d'una millora de l'eficiència energètica no s'efectuarien degut a l'efecte rebot directe.

Pel que fa la refrigeració domèstica es produiria un efecte rebot directe a llarg termini del 86%, el que faria que una millora de l'eficiència energètica dels aparells d'aire condicionat que hagués de reduir potencialment el consum d'electricitat en aquest àmbit en un 10%, acabaria produint només un estalvi real d'electricitat de l'1,4%.

Cal tenir en compte que les poques observacions amb les que s'han realitzat les estimacions –dades anuals per a un període de 13 anys– fan perdre validesa als resultats obtinguts, pel que, en posteriors recerques caldria realitzar les estimacions amb sèries més llargues que proporcionessin uns resultats més robustos. Això ha estat degut a la gran dificultat en l'obtenció de les dades anuals, especialment les de consum d'electricitat, consum d'electricitat per refrigeració a les llars i les dades climàtiques.

## **5.2. Estimacions de l'efecte rebot amb dades municipals**

Addicionalment a les anàlisis econòmiques anuals per Catalunya en conjunt, s'ha realitzat, amb les dades d'un panell de municipis de Catalunya, una estimació de l'efecte rebot directe per al conjunt de serveis energètics que consumeixen electricitat a les llars.

En aquest cas es disposa de dades de consum elèctric a les llars, de preus de l'electricitat domèstica –que no varia entre municipis però sí al llarg del temps–, de RFDB a nivell

municipal i de graus-dia calefacció de 43 municipis de Catalunya pel període que va de 1991 a 2002.

Amb aquestes dades s'ha estimat el Model d'Efectes Fixos (MEF) que mostra la següent equació:

$$C_{it} = \mu_i + \beta_1 P_{it} + \beta_2 RFDB_{it} + \beta_3 HDD_{it} + u_{it}$$

On  $C_{it}$  és el consum d'energia elèctrica a les llars del municipi  $i$  en el període  $t$ ,  $P_{it}$  és el preu de l'energia elèctrica al municipi  $i$  en el període  $t$ ,  $RFDB_{it}$  és la Renda Familiar Disponible Bruta del municipi  $i$  en el període  $t$ , i  $HDD_{it}$  són els graus dia de calefacció de l'estació meteorològica del municipi  $i$  en el període  $t$ .

L'estimació del model d'efectes fixos s'ha realitzat amb ponderacions *cross-section* (*cross-section weights*), és a dir, realitzant una estimació conjunta per Mínims Quadrats Generalitzats (MQG), aprofitant la informació aportada per la matriu de variàncies i covariàncies dels termes de pertorbació de les estimacions individuals. En les estimacions realitzades:  $\mu_i = \mu + \alpha_i$

Taula 10. Estimació d'un MEF de la demanda total d'energia elèctrica a les llars. Panell de municipis de Catalunya. Estimació per MQG (*cross-section weights*).

Dependent Variable:  $\ln(C_{it})$

Included observations: 12

Cross-sections included: 43

Total pool (balanced) observations: 516

Linear estimation after one-step weighting matrix

Variable*	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
$\ln(P_{it})$	-0,565600	0,032566	-17,36774	0,0000
$\ln(RFDB_{it})$	0,534593	0,009955	53,70200	0,0000
$\ln(HDD_{it})$	0,029797	0,011251	2,648506	0,0084
$\mu$	1,956934	0,167300	11,69716	0,0000

Cross-section fixed (dummy variables)

Weighted Statistics			
R-squared	0,999842	Mean dependent var	12,27842
Adjusted R-squared	0,999827	S,D, dependent var	4,532008
S.E. of regression	0,059548	Sum squared resid	1,666613
F-statistic	66278,19	Durbin-Watson stat	1,162346
Prob(F-statistic)	0,000000		

Unweighted Statistics			
R-squared	0,997599	Mean dependent var	10,10876
Sum squared resid	1,672468	Durbin-Watson stat	1,085489

\* Aquesta taula només presenta els coeficients  $\beta$  i  $\mu$  comuns a tots els municipis. L'Annex I. Municipis utilitzats a les estimacions de panell i valors estimats dels termes independents individuals del Model d'Efectes Fixos, presenta els valors  $\alpha_i$  i  $\mu_i$  individuals per a cada municipi.

Adicionalment, s'ha transformat el model anterior en un Model de Mecanisme de Correcció d'Error (MCE), realitzant una estimació en diferències:

$$\Delta C_{it} = \delta_1 \Delta P_{it} + \delta_2 \Delta RFDB_{it} + \delta_3 \Delta HDD_{it} + \delta_4 \Delta C_{it-1} + \tau u_{it-1} + \varepsilon_{it}$$

on  $u_{it-1}$  són els residus resultants de l'estimació de la Taula 10 retardats un període –representa el terme de correcció d'error–. Aquest nou model s'ha estimat per MQG –amb *cross-section weights*–, amb els coeficients estimats comuns a tots municipis.

Taula 11. Estimació d'un MCE de la demanda total d'energia elèctrica a les llars. Panell de municipis de Catalunya. Estimació per MQG (*cross-section weights*).

Dependent Variable:  $\Delta \ln(C_{it})$

Sample (adjusted): 1993 2002

Included observations: 10 after adjustments

Cross-sections included: 43

Total pool (balanced) observations: 430

Linear estimation after one-step weighting matrix

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
$\Delta \ln(P_{it})$	-0,272444	0,049486	-5,505460	0,000000
$\Delta \ln(RFDB_{it})$	0,482544	0,031217	1,545765	0,000000
$\Delta \ln(HDD_{it})$	0,020144	0,009430	2,136032	0,033200
$\Delta \ln(C_{it-1})$	0,096817	0,035814	2,703308	0,007100
$u_{it-1}$	-0,634000	0,045053	-1,407241	0,000000

#### Weighted Statistics

R-squared	0,438668	Mean dependent var	0,046252
Adjusted R-squared	0,433385	S.D. dependent var	0,060525
S.E. of regression	0,045559	Sum squared resid	0,882151
F-statistic	83,032040	Durbin-Watson stat	1,704459
Prob(F-statistic)	0,000000		

#### Unweighted Statistics

R-squared	0,376217	Mean dependent var	0,039082
Sum squared resid	0,900261	Durbin-Watson stat	1,701988

En aquest cas, la significativitat del terme de correcció d'error indica que les sèries estan cointegrades. S'observa com tots els coeficients estimats resulten significatius. Com que l'estimació s'ha realitzat en diferències, el coeficient de determinació resulta menor. Els resultats proporcionats pels d'estadístics i la gran quantitat d'observacions introduïdes en aquest cas, fan considerar les estimacions com a vàlides.

Les estimacions proporcionades a la Taula 10 pel MEF estimat en nivells proporciona els resultats de les elasticitats a llarg termini, mentre que els resultats de les estimacions proporcionades a la Taula 11 pel MCE estimat en diferències proporciona els resultats de les elasticitats a curt termini.

D'aquestes resulten unes elasticitats-preu de la demanda d'electricitat de -0,27 a curt termini, i de -0,57 a llarg termini. L'elasticitat-renda a curt termini resulta de 0,48; mentre que a llarg termini és de 0,53.

Aquests resultats portarien a unes estimacions de l'efecte rebot directe per al conjunt de serveis energètics que utilitzen energia elèctrica a les llars del 27% a curt termini i del 57% a llarg termini, el que faria que un increment de l'eficiència energètica global en aquests serveis que hagués de produir un estalvi del consum d'electricitat de 10, acabaria produint un estalvi de 7,3 a curt termini i de 4,3 a llarg termini. Aquests resultats són similars als obtinguts a l'apartat 5.1 d'estimacions amb dades agregades per tot Catalunya –on s'ha estimat un efecte rebot del 21% a curt termini i del 52% a llarg termini–. Els resultats de les estimacions de panell però, resulten més robustos donada la gran quantitat d'observacions que incorporen, pel que seran aquests els que es consideraran com a vàlids.

### 5.3. Resum d'estimacions de l'efecte rebot directe

De les estimacions realitzades en els apartats anteriors es pot resumir que l'efecte rebot per al conjunt de serveis energètics que utilitzen energia elèctrica a les llars catalanes és del 27% a curt termini i del 57% a llarg termini. Pel cas de la refrigeració domèstica per a climatització a Catalunya s'ha trobat un efecte rebot directe del 86%, però, com s'ha indicat, els resultats per a la refrigeració domèstica no són concloents.

Com indica Sorrell (2007), l'elasticitat estimada per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat estaria mostrant com, un increment de l'eficiència "global" de l'ús de l'electricitat a les llars portaria a l'efecte rebot estimat, però també podria estar suggerint que l'efecte rebot directe d'aquells serveis energètics que dominen el consum global d'electricitat –com podria ser la calefacció en el cas de les llars catalanes– seria de l'ordre d'aquella magnitud.

Cal tenir en compte que, donades les definicions desenvolupades en el capítol 3, a partir de les quals s'han derivat les estimacions de l'efecte rebot, aquest podria resultar:

1. Sobreestimat: pel possible relaxament de les hipòtesis d'endogeneïtat de l'eficiència energètica, és a dir, que l'eficiència energètica no es veu afectada per canvis en els preus energètics; i de simetria, és a dir, que els consumidors responen de la mateixa manera a increments –decrements– dels preus energètics que a decrements –increments– en l'eficiència energètica. Aquestes hipòtesis són necessàries per a poder considerar l'elasticitat-preu de la demanda d'energia dels serveis energètics com una mesura de l'efecte rebot. Així com la primera no hauria de sobreestimar els resultats obtinguts, pel fet que s'han realitzat en un període de decreixement dels preus energètics que, segons la literatura, no afectaria l'eficiència energètica, la segona hipòtesi –de simetria– seria més discutible, i podria afectar les estimacions en alguna mesura.

2. Infraestimat: donada la relació entre l'efecte rebot i els costos de capital –equació (19)–, i la tendència decreixent que mostren els preus dels aparells d'aire condicionat al

llarg del període en consideració –veure apartat 4.3–, podria succeir que, donat que no s'han considerat els costos de capital en les estimacions, s'infraestimés l'efecte rebot. Els nous aparells més eficients amplificarien l'efecte rebot si resulten menys costosos que els anteriors menys eficients. Caldria constatar si la resta d'aparells domèstics que utilitzen electricitat també han seguit aquesta tendència.

La dificultat en l'obtenció de determinades variables per la seva inclusió en les estimacions ha estat la causa de la seva no consideració en les anàlisis. Caldria introduir tots aquests aspectes de manera explícita en posteriors recerques, analitzant de manera més precisa com afecta cadascun d'aquests en les estimacions de l'efecte rebot directe per aquesta via.

Addicionalment, aquestes estimacions es considerarien, sota les hipòtesis discutides, com un límit superior de l'efecte rebot, donat que com s'ha demostrat a l'apartat 3.3.4:

$$\left| \eta_{P_S}(S) \right| \leq \left| \eta_{P_E}(E) \right|$$



## 6. IMPLICACIONS PER A LA POLÍTICA ENERGÈTICA

La millora de l'eficiència energètica ha estat i és en molts països, una part clau de l'estratègia per a afrontar l'escalfament global. Aquest fet es fonamenta en la creença que una millora de l'eficiència porta a un consum energètic menor, i com a conseqüència a una reducció de l'emissió de gasos d'efecte hivernacle. Els governs dediquen molts esforços en la millora de l'eficiència energètica nacional com a solució dels problemes ambientals, però en última instància aquests guanys en l'eficiència han estat utilitzats per a potenciar el creixement econòmic i el progrés, més que per a reduir el consum de recursos.

Com es mostra en aquest treball, promoure l'eficiència energètica per si sol, no té perquè ser necessàriament la millor via per a estalviar energia i reduir la contaminació. Caldria considerar les mesures d'eficiència energètica en un context més ampli de polítiques energètiques, amb la finalitat i voluntat explícites de reduir el consum de recursos i les emissions contaminants.

L'efecte rebot és rarament tingut en compte en les anàlisis oficials sobre els estalvis energètics potencials de les millores de l'eficiència energètica. En relació a aquest fet es troba una excepció com és la política del Regne Unit per a millorar l'aïllament tèrmic de les cases, on s'espera que alguns dels beneficis es tradueixin en majors temperatures internes, més que en reduir el consum energètic (DEFRA, 2007). Però l'efecte rebot directe per a altres àmbits és generalment ignorat, de la mateixa manera que també ho són els potencials efectes indirectes –que segons la literatura sobre el tema indica, podrien ser de major magnitud que els directes–. Cal que es comenci a considerar de manera explícita l'efecte rebot i realitzar polítiques d'eficiència coherents amb aquest.

Estimacions elevades de l'efecte rebot impliquen polítiques tecnològiques d'eficiència amb un control addicional sobre altres variables com els preus de l'energia, ja sigui a través de mesures de fiscalitat ambiental o altres. En cas de no aplicar aquestes mesures addicionals, els estalvis potencials d'energia i d'emissions de carboni podrien no fer-se

efectius. Encara que l'efecte rebot no resultés en “backfire”, l'aplicació de mesures de fiscalitat ambiental o de control d'altres variables permetria aprofitar al màxim els estalvis potencials derivats d'una millora de l'eficiència energètica; en cas contrari la política perdria eficàcia i s'estarien malbaratant esforços.

Caldria reevaluar des d'aquesta perspectiva determinades mesures que s'estan portant a terme en molts països per a millorar l'eficiència energètica. L'equació (19) –que inclou els costos de capital del servei energètic en la formulació matemàtica de l'efecte rebot– mostra, de manera senzilla, cap a on es podria dirigir l'efecte rebot a l'hora de portar a terme polítiques d'eficiència energètica sobre determinats serveis energètics, a partir de la subvenció d'aparells més eficients. Com mostra l'equació, una part de l'efecte rebot es podria compensar si els nous aparells més eficients resulten més costosos, sempre i quan els consumidors assumissin la totalitat del cost del servei energètic. Una política de subvenció dels aparells més eficients que els faci més econòmics que els aparells ineficients podria, contràriament, amplificar l'efecte rebot.

Per tots aquests i altres aspectes és important seguir avançant la recerca en l'anàlisi i estimació de l'efecte rebot i començar a tenir-lo en consideració a l'hora de portar a terme polítiques d'estalvi energètic.

## 7. CONCLUSIONS I FUTURES LÍNIES DE RECERCA

En aquest treball s'ha analitzat de manera teòrica l'efecte rebot i s'ha fet una estimació empírica per a Catalunya de l'efecte rebot directe. L'efecte rebot directe es produeix, per a un servei energètic, quan una millora en la seva eficiència energètica no es tradueix en l'estalvi energètic que potencialment s'hauria de produir en aquell àmbit. Això és degut a què la millora de l'eficiència produeix un abaratiment del cost del servei energètic, que s'acaba traduint en un major consum d'aquest, compensant total o parcialment l'estalvi derivat de la major eficiència.

L'efecte rebot és diferent per cada ús final d'energia i per cada sector de l'economia, i la resposta a nivell microeconòmic és diferent que la que es produeix a nivell macroeconòmic. L'efecte rebot també pot variar entre països, en funció del període d'anàlisi, dels costos energètics, la demanda dels serveis energètics, i altres factors. Alguns estudis apunten que és considerablement major en països en desenvolupament que en països més industrialitzats, degut a la major llunyania dels seus consums actuals en la majoria de serveis energètics, respecte dels nivells òptims de confort, entre altres.

Malgrat hi ha cert consens entre la comunitat científica de que l'efecte rebot existeix, hi ha discrepàncies a l'hora de determinar la seva magnitud. Mentre alguns sostenen que una millora de l'eficiència produeix cert estalvi d'energia –encara que menor que el potencial–, altres afirmen que després d'una millora de l'eficiència es produeix un augment net del consum d'energia, produint-se el que a la literatura s'anomena “backfire” –també conegut com a Paradoxa de Jevons o postulat de Khazzoom-Brookes–. Un problema clau a l'hora de resoldre aquesta confrontació és que no és possible de portar a terme experiments històrics “controlats” per a veure, si l'ús energètic és major o menor que si no hi haguessin hagut guanys en l'eficiència energètica.

Sota determinades condicions es pot demostrar com l'efecte rebot directe equival a l'elasticitat-preu de la demanda d'energia, per a un servei energètic.

En aquest treball s'ha realitzat una estimació empírica de l'efecte rebot directe per al conjunt de serveis energètics que consumeixen electricitat a les llars i una altra per a la refrigeració per a climatització domèstica a Catalunya.

Mitjançant diverses tècniques econòmriques s'han obtingut unes estimacions de -0,27 de l'elasticitat-preu de la demanda d'electricitat a curt termini i de -0,57 a llarg termini. També s'ha obtingut una estimació de -0,86 de l'elasticitat-preu de la demanda d'electricitat per a refrigeració a les llars. Això implicaria un efecte rebot del 27% a curt termini i del 57% a llarg termini, per al conjunt de serveis energètics que utilitzen electricitat a les llars; i del 86% per a la refrigeració domèstica. Les estimacions per a la refrigeració domèstica no s'han considerat prou concloents donades les poques observacions amb les que s'han realitzat les estimacions econòmriques.

Els resultats obtinguts en les estimacions sobre el conjunt de serveis energètics domèstics resulten similars als obtinguts en altres treballs empírics. L'únic treball que es té constància d'haver estimat l'efecte rebot per a un conjunt de serveis energètics a les llars que incloïen il·luminació i aparells electrònics és el treball de Guertin *et al.* (2003), en el que es va trobar un efecte rebot d'entre el 32% i el 49% a llarg termini. Pel que fa a la refrigeració domèstica, els dos estudis dels quals es té constància són Hausman (1979) i Dubin *et al.* (1986), fets per als EEUU, i que proporcionen unes estimacions de l'efecte rebot inferiors als resultats obtinguts per a Catalunya –entre el 0% i el 50%–.

Les estimacions realitzades tenen importants implicacions per la política energètica a Catalunya. Tot i que aquestes polítiques no resultarien totalment ineficaces o contraproductes per sí soles –com passaria sota l'existència de *backfire*, és a dir, un efecte rebot major del 100%–, sí que es veu reduïda la seva eficàcia. Les estimacions realitzades impliquen una important reducció de l'eficàcia de les polítiques de millora de l'eficiència energètica a les llars i, per tant, certa ineficàcia en la reducció d'emissions de gasos d'efecte hivernacle i en l'assignació de recursos públics, si no s'apliquen mesures de control de l'efecte rebot.

Les principals mancances del treball realitzat han estat:

- La principal, la falta de dades sobre variables per a la consideració de més elements en les estimacions –sobretot dades d'eficiència energètica i de treball útil dels serveis energètics–, que haguessin permès estimacions més exactes de l'efecte rebot directe, sense l'estimació indirecta per la via de l'estimació d'elasticitats-preu de la demanda d'energia.
- Derivada de l'anterior, la incertesa sobre la validesa de les hipòtesis de simetria i endogeneïtat de l'eficiència energètica en les estimacions realitzades i com poden haver afectat als resultats obtinguts.
- La falta de sèries més llargues per a arribar a resultats més conclusius, especialment pel que fa a les estimacions de l'efecte rebot directe per a refrigeració domèstica.
- La necessitat de realitzar més recerca sobre les implicacions polítiques dels resultats obtinguts.

Caldria en posteriors recerques ampliar i millorar les estimacions de l'efecte rebot directe, analitzant com aquest s'estén a tota l'economia i analitzar les implicacions polítiques dels resultats obtinguts, analitzant instruments i mecanismes de control de l'efecte rebot coherents amb les polítiques d'eficiència energètica portades a terme.

## 8. REFERÈNCIES

- Allan, G., N. Hanley, P. G. McGregor, J. Kim Swales i K. Turner (2006). *The macroeconomic rebound effect and the UK economy*. Final report to the Department Of Environment Food and Rural Affairs, Department Economics, University of Strathclyde, Strathclyde.
- Angel Economic Reports and Applied Econometrics (1984). *Survey of Conditional Energy Demand Models for Estimating Residential Unit Energy Consumption Coefficients*. EPRI EA-3410. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- Barker, T., P. Ekins i T. Foxon, (2007). *Macroeconomic effects of efficiency policies for energyintensive industries: the case of the UK Climate Change Agreements, 2000-2010*. Energy Economics, 29(5), 760-78.
- Barker, T. i T. Foxon, (2006). *The macroeconomic rebound effect and the UK economy*. Report to the Department of the Environment, food and Rural Affairs, 4CMR, Cambridge.
- Becker, G. S. (1965). *A theory of the allocation of time*. The Economic Journal, LXXV (299), 493–517.
- Berkhout, P. H., Muskens, J. C. i J. W. Velthuisen (2000). *Defining the rebound effect*. Energy Policy, 28, 425–432.
- Besen, S. M. i L. Johnson (1982). *Comment on economic implications of mandated efficiency standards for household appliances*. Energy Journal 3(1), 110–116.
- Binswanger, M. (2001). *Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect?* Ecological Economics 36 (1), 119–132.
- Blair, R. D., D. L. Kaserman i R. C. Tepel (1984). *The impact of improved mileage on gasoline consumption*. Economic Inquiry, XXII, 209–17.
- Boardman, B. i G. Milne (2000). *Making cold homes warmer: the effect of energy efficiency improvements in low-income homes*, Energy Policy, 218 (6-7), 411-24.
- Brännlund, R., Ghalwash, T., i J. Nordström (2007). *Increased Energy Intensity and the Rebound Effect: Effects on Consumption and Emissions*. Energy Economics, 29(1), 1-17.

- Brookes, L. G. (1978). *Energy policy, the energy price fallacy and the role of nuclear energy in the U.K.* Energy Policy 6, 94–106.
- Brookes, L. G. (1979). *A Low Energy Strategy for the UK*, per G. Leach et al.: *a Review and Reply*. Atom 269, 3–8.
- Brookes, L. G. (1990). *The greenhouse effect: the fallacies in the energy efficiency solution*. Energy Policy, 18(2), 199–201.
- Brookes, L. G. (1992). *Energy efficiency and economic fallacies - a reply*. Energy Policy, 20(5), 390–92.
- Brookes, L. G., (1993). *Energy efficiency fallacies – the debate concluded*. Energy Policy, 21(4), 346–47.
- Brookes, L. G. (2000). *Energy efficiency fallacies revisited*. Energy Policy, 28 (6–7), 355–66.
- Cuijpers, C. (1995). *A joint model of household space heat production and consumption: empirical evidence from a Belgian micro-data survey*. A: *the Twenty-First Century: Harmonizing Energy Policy, Environment and Sustainable Economic Growth*, Proceedings of 18th IAEE International Conference. Washington DC, July 5–8.
- Cuijpers, C. (1996). *An empirical investigation into the economics of house heating*. Public Economics Research, Paper Number 50., Centrum Voor Economische Studien, Leuven, Belgium.
- DEFRA (2007). *Consultation document: energy, cost and carbon savings for the draft EEC 2008 - 11 illustrative mix*, Department of Environment, Food and Rural Affairs, London.
- Dahl, C. (1993). *A survey of energy demand elasticities in support of the development of the NEMS*. Preparat pel US Department of Energy, Contract No. De-AP01-93EI23499, Department of Mineral Economics, Colorado School of Mines, Colorado.
- Dargay, J. M. (1992). *Are price & income elasticities of demand constant? The UK experience*. Oxford Institute for Energy Studies, Oxford, U.K.
- Dargay, J. M. i D. Gately (1994). *Oil demand in the industrialised countries*. Energy Journal, 15 (Special Issue), 39–67.

Dargay, J. M. i D. Gately (1995). *The imperfect price irreversibility of non-transportation of all demand in the OECD*. Energy Economics, 17 (1), 59–71.

Davis, L. W. (2007). *Durable goods and residential demand for energy and water: evidence from a field trial*, Working Paper, Department of Economics, University of Michigan.

Departament de Treball i Indústria (2006). *Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015*. Generalitat de Catalunya.

Department of Trade and Industry (2007). *Energy consumption in the United Kingdom*, Department of Trade and Industry, London.

Dimitropoulos, J. i S. Sorrell (2006). *The Rebound effect: Microeconomic Definitions, Extensions and Limitations*. Proceedings of the 29th IAEE International Conference, Potsdam, Germany.

Dinan, T.M. (1987). *An Analysis of the Impact of Residential Retrofit on Indoor Temperature Choice*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.

Douthitt, R. A. (1989). *An economic analysis of the demand for residential space heating fuel in Canada*. Energy, 14 (4), 187–97.

Dubin, J. A., Miedema, A. K. i R. V. Chandran (1986). *Price effects of energy-efficient technologies: a study of residential demand for heating and cooling*. Rand Journal of Economics 17(3), 310–325.

Einhorn, M. (1982). *Economic implications of mandated efficiency standards for household appliances: an extension*. Energy Journal 3(1), 103–109.

Espey, M. (1998). *Gasoline demand revisited: an international meta-analysis of elasticities*. Energy Economics, 20, 273–95.

Eto, J., Kito, S., Shown, L. i R Sonnenblick (1995). *Where did the money go? The cost and performance of the largest commercial sector DSM programs*. LBNL-38201, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

Eto, J., Vine, E., Shown, L., Sonnenblick, R. i C. Payne (1994). *The cost and performance of utility lighting programs*. LBNL-34967, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.



- Fouquet, R. i P. Pearson (2006). *Seven centuries of energy service: the price and use of light in the United Kingdom (1300–2000)*. The Energy Journal 27 (1), 139–176.
- Fronzel, M. (2004). *Empirical assessment of energy price policies: the case for cross price elasticities*. Energy Policy, 32, 989-1000.
- Fronzel, M., J. Peters i C. Vance (2007). *Identifying the rebound: issues and empirical evidence from a German household panel*. RWI Discussion Papers No. 57 Essen.
- Fronzel, M. i C. M. Schmidt (2005). *Evaluating Environmental Programs: The Perspective of Modern Evaluation Research*. Ecological Economics, 55(4), 515-26.
- Gately, D. (1990). *The US demand for highway travel and motor fuel*. Energy J. 11, 59–73.
- Gately, D. (1992). *Imperfect price reversed ability of US gasoline demand: asymmetric responses to price increases and declines*. Energy Journal, 13 (4), 179–207.
- Gately, D. (1993). *The imperfect price reversibility of world oil demand*, Energy Journal, 14 (4), 163–82.
- Greene, D.L. (1992). *Vehicle use and fuel economy: how big is the rebound effect?* Energy J. 13, 117–143.
- Greene, D.L., Kahn, J. i R. C. Gibson (1998). *Estimating the rebound effect for household vehicles in the U.S.* Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- Greene, D.L., Kahn, J. i R. C. Gibson (1999a). *An Econometric Analysis of the Elasticity of Vehicle Travel with Respect to Fuel Cost per Mile using the RTEC Survey Data*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Greene, D.L., Kahn, J.R. i R. C. Gibson (1999b). *Fuel economy rebound effect for US household vehicles*. Energy Journal 20 (3), 1–31.
- Greening, L. A. i D. L. Greene (1998). *Energy use, technical efficiency, and the rebound effect: a review of the literature*. Informe al U.S. Department of Energy. Hagler Bailly and Co., Denver.
- Greening, L. A., Greene, D. L. i C. Difiglio (2000). *Energy efficiency and consumption - the rebound effect - a survey*. Energy Policy, 28, 389–401.

- Grepperud, S. i I. Rasmussen (2004). *A general equilibrium assessment of rebound effects*. Energy Economics 26 (2), 261–282.
- Grubb, M. J. (1995). *Asymmetrical price elasticities of energy demand*, a “Global warming and energy demand”. T. Barker, P. Ekins and N. Johnstone eds, Routledge, London and New York.
- Guertin, C., Kumbhakar, S., i A. Duraipappah (2003). *Determining Demand for Energy Services: Investigating income-driven behaviours*. International Institute for Sustainable Development.
- Haas, R. i P. Biermayr (2000). *The rebound effect for space heating—Empirical evidence from Austria*. Energy Policy 28(6–7): 403–410.
- Haas, R. i L. Schipper (1998). *Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements*. Energy Economics, 20 (4), 421–42.
- Hanly, M., Dargay, J. i P. Goodwin (2002). *Review of income and price elasticities in the demand for road traffic*. ESRC Transport Studies Unit, University College London.
- Hartman, R. S. (1988). *Self-selection bias in the evaluation of voluntary energy conservation programs*. The Review of Economics and Statistics, 70 (3), 448–58.
- Haughton, J. i S. Sarkar (1996). *Gasoline tax as a corrective tax: estimates for the United States, 1970-1991*. The Energy Journal 17(2), 103–126.
- Hausman, J. A. (1979). *Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-Using Durables*. Bell Journal of Economics, 10(1), 33–54.
- Henly, J., Ruderman, H. i M.D. Levine (1988). *Energy savings resulting from the adoption of more efficient appliances: a follow-up*. Energy Journal 9 (2), 163–170.
- Herring, H. (1999). *Does energy efficiency save energy? The debate and its consequences*. Applied Energy 63, 209–226.
- Herring, H. (2006). *Energy efficiency—a critical view*. Energy, 31(1), 10–20.
- Hirst, E. (1987). *Changes in indoor after retrofit based on electricity billing and weather data*. Energy Syst. Policy 10, 1–20.

- Hong, S. H., Oreszczyn, T. i I. Ridley (2006). *The impact of energy efficient refurbishment on the space heating fuel consumption in English dwellings*. Energy and Buildings 38 (10), 1171–1181.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007*. IPCC Fourth Assessment Report (AR4).
- Isakson, H. R. (1983). *Residential space heating: an analysis of energy conservation*. Energy Economics 5, 49–57.
- Jevons, W. S. (1865). "The Coal Question". London: Macmillan and Co.
- Jones, C.T. (1993). *Another look at US passenger vehicle use and the rebound effect from improved fuel efficiency*. Energy J. 14, 99–110.
- Junankar, S., Lofsnaes O. i P. Summerton (2007). *MDM-E3: a short technical description*. Working Paper, Cambridge Econometrics.
- Juster, F. T. i F. P. Stafford (1991). *The allocation of time: empirical findings, behavioural models and problems of measurement*. Journal of Economic Literature, 29(2), 471–522.
- Khazzoom, J. D. (1980). *Economic Implications of Mandated Efficiency Standards for Household Appliances*. Energy Journal 1, 21–39.
- Khazzoom, J. D. (1982). *Response to Besen and Johnson's comment on economic implications of mandated efficiency standards for household appliances*. Energy Journal 3(1), 117–124.
- Khazzoom, J. D. (1986). *An Econometric Model Integrating Conservation in the Estimation of the Residential Demand for Electricity*. JAI Press, Greenwich, CT.
- Khazzoom, J. D. (1987). *Energy savings from the adoption of more efficient appliances*. Energy Journal 8(4), 85–89.
- Khazzoom, J. D. (1989). *Energy savings from more efficient appliances: a rejoinder*. Energy Journal 10(1), 157–165.
- Khazzoom, J. D. i S. Miller (1982). *Economic implications of mandated efficiency standards for household appliances: response to Besen and Johnson's comments*. Energy Journal 3(1), 117–124.

- Kouris, G. (1982). *Elasticities - science or fiction?* Energy Economics, 3(2), 66-70.
- Leach, G. et al. (1979). *Low Energy Strategy for the UK*. London : IIED
- Lenzen, M. (1998). *Energy and greenhouse gas cost of living for Australia during 1993/94*. Energy, 23(66), 497-516.
- Leung, P. S. i M. H. Vesenska (1987). *Forecasting a state-specific demand for highway fuels*. Energy Syst. Policy 10, 167–188.
- Lovins, A. B. (1977). "Soft Energy Paths: Toward a durable peace". Penguin Books.
- Lovins, A. B. (1998). *Further comments on Red Herrings*. Carta a the New Scientist, Nº 2.152, 18 September.
- Lovins, A. B., J. Henly, H. Ruderman, i M. D. Levine, (1988). *Energy saving resulting from the adoption of more efficient appliances: another view; a follow-up*. The Energy Journal, 9(2), 155.
- Margarit, J.; Vilalta, Ll. i M. Escobar (2003). "Els graus dia de calefacció i refrigeració de Catalunya. Institut Català d'Energia". Departament de Treball, Indústria, Comerç i Turisme. Generalitat de Catalunya.
- Mayo, J. W. i J. E. Mathis (1988). *The Effectiveness of Mandatory Fuel Efficiency Standards in Reducing the Demand for Gasoline*. Applied Economics, 20 (2), 211–19.
- Miller, E. M. (1986). *Cross-sectional and time-series biases in factor demand studies: explaining energy-capital complementarity*. Southern Economic Journal, 52(3), 745-62.
- Nadel, S. M. (1993). *The takeback effect: fact or faction?* Proceedings of the 1993 Energy Program Evaluation Conference, Chicago, Illinois, 556–566.
- Nesbakken, R. (2001). *Energy consumption for space heating: a discrete-continuous approach*. Scandinavian Journal of Economics, 103(1), 165-84.
- Parti, M., i C. Parti (1980). *The total and appliance specific conditional demand for electricity in the household sector*. The Bell Journal of Economics, 11 (1), 309–21.
- Patterson, M. G. (1996). *What is energy efficiency: concepts, indicators and methodological issues*. Energy Policy, 24 (5), 377–90.

- Pollack, R. A. i M. L. Wachter (1975). *The relevance of the household production function and its implications for the allocation of time*. Journal of Political Economy, 83 (2), 255–77.
- Quigley, J. i D. Rubinfeld (1989). *Unobservables in consumer choice: residential energy and the demand for comfort*. Review of Economics and Statistics 70, 416–425.
- Richmond, A. K. i R. K. Kaufmann (2006). *Is there a turning point in the relationship between income and energy use and/or carbon emissions?* Ecological Economics, 56(2), 176-89.
- Roy, J. (2000). *The rebound effect: some empirical evidence from India*. Energy Policy, 28(6-7), 433-438.
- Sanders, M. i M. Phillipson (2006). *Review of differences between measured and theoretical energy savings for insulation measures*. Centre for Research on Indoor Climate and Health, Glasgow Caledonian University, Glasgow.
- Saunders, H. (1992). *The Khazzoom-Brookes Postulate and Neoclassical Growth*. Energy Journal, Vol.13 (4), 131–148.
- Saunders, H. D. (2007). *Fuel conserving (and using) production function*. Working Paper, Decision Processes Incorporated, Danville, CA.
- Sartori, I. i A. G. Hestnes (2007). *Energy use in the life-cycle of conventional and low-energy buildings: a review article*. Energy and Buildings, 39, 249-57.
- Schipper, L. i M. Grubb, (2000). *On the rebound? Feedback between energy intensities and energy uses in IEA countries*. Energy Policy, 28(6-7), 367–88.
- Schwartz, P. M. i T. N. Taylor (1995). *Cold hands, warm hearth?: climate, net takeback, and household comfort*. Energy Journal 16(1), 41–54.
- Small, K. A. i K. Van Dender (2005). *A study to evaluate the effect of reduced greenhouse gas emissions on vehicle miles travelled*. Preparat per al State of California Air Resources Board, the California Environment Protection Agency and the California Energy Commission, Final Report ARB Contract Number 02–336, Department of Economics, University of California, Irvine.

- Sorrell, S. (2007). *The rebound effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency*. UK Energy Research Centre. October, 2007.
- Stern, D. I. (2000). *A multivariate cointegration analysis of the role of energy in the US macroeconomy*. Energy Economics, 22, 267-83.
- Stern, D. I. (2004). *Elasticities of substitution and complementarity*. Working Paper a Economics, No. 0403, Rennsselaer Polytechnic Institute.
- Train, K. E. (1994). *Estimation of net savings from energy-conservation programs*. Energy, 19(4), 423-41.
- Walker, I.O. i F. Wirl (1993). *Asymmetric energy demand due to endogenous efficiencies: an empirical investigation of the transport sector*. Energy J. 14, 183–205.
- Weinblatt, H. (1989). *The FHWA: Faucett VMT Forecasting Model*. Jack Faucett Associates, Bethesda, MA.
- West, S. E. (2004). *Distributional effects of alternative vehicle pollution control policies*. Journal of Public Economics, 88, 735-57.
- Wirl, F. (1997). "The economics of conservation programs", Kluwer, Dordrecht.

## ANNEX I. MUNICIPIS UTILITZATS A LES ESTIMACIONS DE PANELL I VALORS ESTIMATS DELS TERMES INDEPENDENTS INDIVIDUALS DEL MODEL D'EFECTES FIXOS

Taula 12. Valors estimats dels efectes individuals de les estimacions del Model d'Efectes Fixos

Municipi	$\alpha_i$	$\mu_i = \mu + \alpha_i^*$
Arenys de Munt	-0,553426	2,701
Badalona	0,743734	3,790
Barcelona	1,832952	1,905
Berga	-0,051780	2,120
Blanes	0,162597	1,773
Caldes de Montbui	-0,183843	1,752
Cardedeu	-0,204940	2,409
Castell-Platja d'Aro	0,452398	1,468
Cervera	-0,488933	2,280
Vilanova i la Geltrú	0,322650	1,738
Deltebre	-0,219308	1,830
Esparreguera	-0,127161	1,990
Figueres	0,032958	2,144
Gavà	0,187548	2,468
Girona	0,511015	2,320
Granollers	0,363442	2,126
Igualada	0,168880	1,404
Llinars del Vallès	-0,553091	2,468
Manresa	0,510818	1,734
Martorell	-0,222478	1,654
Mollerussa	-0,303130	1,258
Montblanc	-0,698641	1,758
Olesa de Montserrat	-0,198930	1,558
Parets del Vallès	-0,398465	1,577
Puigcerdà	-0,379634	2,319
Reus	0,362261	1,143
Riudoms	-0,813735	2,338
Roses	0,381275	2,681
Sabadell	0,724210	2,520
Salou	0,562959	1,581
Sant Celoni	-0,375829	1,631
Sant Sadurní d'Anoia	-0,325799	1,447
Santa Maria de Palautordera	-0,510025	2,224
Sitges	0,266757	1,434
Solsona	-0,522762	0,798
Sort	-1,158990	1,650
Tàrraga	-0,307117	2,722
Terrassa	0,765531	1,433
Tona	-0,524149	1,974
Tortosa	0,016773	1,825
Valls	-0,132199	2,280
Vilafranca del Penedès	0,322650	2,520
Salou	0,562959	2,701
<b>TOTAL</b>	<b>0</b>	

\* El valor de  $\mu$  a les estimacions del MEF de la Taula 10 ha resultat de 1,957.